

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática
2017-2018

Trabajo Fin de Grado

“ANÁLISIS DE LOS LÍMITES DE
OPERACIÓN DE
HIDRO-FLUORO-ÉTERES PARA LA
REFRIGERACIÓN DE SISTEMAS DE
COMPUTACIÓN DE ALTA DENSIDAD”

María Aurora Crespo de Aguilar

Tutor/es

Samira Briongos Herrero

Braulio García Cámara

Leganés 09/10/2018



Esta obra se encuentra sujeta a la licencia Creative Commons **Reconocimiento - No Comercial - Sin Obra Derivada**

RESUMEN

El incremento de aplicaciones que requieren de una elevada capacidad de cómputo, ha provocado la creación de nuevos centros de datos, incrementando la cantidad de servidores necesarios para ofrecer soporte a un gran número de usuarios. El crecimiento del número de centros de datos conlleva un aumento de la energía demandada, tanto para los equipos dedicados al procesamiento y almacenamiento de datos como para la refrigeración de los mismos.

Este aumento de la potencia requerida no es sostenible y, genera la necesidad de mejorar la eficiencia energética mediante nuevos sistemas de refrigeración, capaces de mejorar los consumos de suministro eléctrico, generación de calor y rendimiento.

La implementación de los sistemas de refrigeración mediante el uso de hidro-fluoro-éteres, ofrecen una solución prometedora a los problemas que conlleva el aumento del consumo que requieren los centro de datos ante las nuevas necesidades.

En este trabajo se diseñan y desarrollan unos prototipos dedicados a la generación de calor controlada, que puedan ser sumergidos en el líquido y que sirvan para el estudio de las capacidades del mismo. Permiten monitorizar la temperatura alcanzada por el líquido, con el objetivo de averiguar su capacidad de arrastre de calor, así como obtener su curva característica.

Se explican detalladamente todas las etapas requeridas para la obtención del prototipo, incluyendo el diseño hardware y el software embebido en el microcontrolador. Por último, una vez montados los prototipos se realizan una serie de experimentos encaminados a mostrar las bondades del líquido y a probar que el prototipo desarrollado sirve para su propósito.

Palabras clave: Centros de datos, refrigeración, modelado de temperatura, eficiencia energética, HFE.

ABSTRACT

Due to the increasing number of applications demanding high processing capabilities, the creation of new data centers has increased dramatically as it has increased the number of servers required to provide such applications to users. The growth in the number of data centers involves a rise in the demanded energy to supply both the equipment dedicated for processing and storing data and the cooling system.

This rise of the power required is not sustainable and, generates the need of improving the energy efficiency by means of new refrigeration systems able to reduce the consumption of power, the heat generation and to improve performance.

The implementation of refrigeration systems using hydro-fluoro-ethers offers a promising solution to problems related to the increase of power consumption in data centers when facing the new needs.

This work is focused in the design and development of dedicated prototypes which are able to generate heat in a controlled way and to be submerged in the fluid so they can be used for studying the characteristics of the fluid. They allow fluid temperature monitorization with the aim of finding out its heat drag capacity, as well as obtaining its characteristic curve.

All the phases required to obtain the prototype are explained in detail, including hardware design and a description of the software embedded in the microcontroller. Finally, once the prototypes are assembled, different experiments are carried out to show some benefits of the fluid and to prove that the developed prototype fulfills its purpose.

Keywords: Data centers, cooling, thermal modeling, energy efficiency, HFE

DEDICATORIA

Deseo expresar mi agradecimiento, a todas aquellas personas que han estado conmigo a lo largo de esta etapa universitaria.

A mis padres, Aurora y Fernando, y a mi hermana Cristina, quienes han estado conmigo desde el comienzo. Sin su apoyo alcanzar la meta no hubiera sido posible.

A Samira y Braulio, por su paciencia y aportación a este trabajo fin de grado.

A todos aquellos que me han dado su apoyo durante la elaboración del TFG, son muchos los que han estado en todo momento: Saúl, María, Pedro... Es imposible nombraros a todos, pero gracias de corazón.

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN.	1
1.1. Marco regulador	9
1.1.1. Legislación	9
1.1.2. Estándares	9
2. MOTIVACIÓN	10
3. OBJETIVO.	11
4. ESTADO DEL ARTE.	13
4.1. Refrigeración por aire	13
4.1.1. Pasillo caliente/Pasillo frío (Hot Aisle/Cold Aisle)	13
4.1.2. Contención de pasillo frío (Cold Aisle Containment).	14
4.1.3. Contención de pasillo caliente (Hot Aisle Containment).	15
4.1.4. Ventilación natural mecánica (Free cooling).	16
4.2. Refrigeración líquida.	17
4.2.1. Refrigeración con agua	18
4.2.2. Refrigeración por inmersión indirecta	19
4.2.3. Refrigeración por inmersión directa monofásica	19
4.2.4. Refrigeración por inmersión directa en dos fases	20
5. ESPECIFICACIONES	22
5.1. Requisitos.	23
5.1.1. Bloque calefactor.	23
5.1.2. Bloque de sensado	24
5.1.3. Bloque de control	24
5.1.4. Bloque de comunicación	25
6. SUBSISTEMA HARDWARE	27
6.1. Componentes	27
6.1.1. Calefactor.	27
6.1.2. Sensor de temperatura LM235Z	30
6.1.3. Optoacoplador LTV-814-S-TA1, Opto-DIAC MOC3020.	33

6.1.4. Triac BT136X-600E	34
6.1.5. Microcontrolador PIC16F18426	37
6.1.6. Conectores	44
6.2. Diseño esquemático y PCB	45
7. SUBSISTEMA SOFTWARE.	49
7.1. Visión global del sistema	49
7.1.1. ADC.	50
7.1.2. Paso por cero y control del triac	52
7.1.3. Comunicación I2C	55
8. EVALUACIÓN DEL PROTOTIPO	59
8.1. Prototipo en el aire	59
8.2. Prototipo en líquido	61
9. CONCLUSIONES	67
10. ENTORNO SOCIO-ECONÓMICO	68
10.1. Impacto socio-económico	68
BIBLIOGRAFÍA	70
A. ANEXO 1: ACRÓNIMOS.	
B. ANEXO 2: PRESUPUESTO DE LA ELABORACIÓN DEL TFG	

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Estimación de la evolución de dispositivos IoT en miles de millones, IHS Markit [1]	1
1.2	Crecimiento de centros de datos hiperescala, Cisco [7]	2
1.3	Estimación de los recursos soportados por centros de datos hiperescala para el año 2021, Cisco [7]	3
1.4	Desglose de la eficacia del uso de la energía, TechTarget [8]	4
1.5	Sistema de refrigeración de pasillo frío, 42U [13]	5
1.6	Ejemplo de configuración de tanque de inmersión en dos fases, 3M [18] .	6
1.7	Arrastre de calor teórico en función de la temperatura, cedida por 3M . .	8
4.1	Disipación de calor frontal-posterior equipos IT, Oracle [27]	13
4.2	Ejemplo distribución sistema de refrigeración pasillo caliente/pasillo frío, 42U [26]	14
4.3	Diagrama de funcionamiento contención pasillo frío, blog <i>aodbc</i> [28] . .	15
4.4	Diagrama de funcionamiento contención pasillo caliente, blog <i>aodbc</i> [28]	15
4.5	Centro de datos de ventilación natural mecánica	17
4.6	Comparativa de potencia y costes de refrigeración líquida respecto a la refrigeración por corrientes de aire, Chilldyne [32]	18
4.7	Sistema de refrigeración CRAH, Dan Mascola [33]	18
4.8	Sistema de refrigeración InRow, Developers Club [35]	19
4.9	Refrigeración por inmersión directa monofásica, Revolvly [37]	20
4.10	Ventajas de la refrigeración por inmersión directa en dos fases, 3M [20] .	20
5.1	Diagrama general del sistema	22
5.2	Prototipo y bloques que lo componen	23
6.1	Rectas de aumento de temperatura, Pedro Guerra UPM [38]	28
6.2	Valores de las variables k,c,b para pistas externas, Pedro Guerra UPM [38]	29
6.3	Parámetros definidos para el serpentín mediante el uso de la calculadora digital [39]	29
6.4	Sensor de temperatura LM235Z	30

6.5	Variación de voltaje frente a la corriente inversa en el LM235Z, ST [40]	31
6.6	Símbolo esquemático del LM235Z, ST [40]	31
6.7	Montaje de sensor de temperatura básico, ST [40]	32
6.8	Optoacoplador LTV-814S-TA1	33
6.9	Opto-DIAC MOC3020	34
6.10	Triac BT136X-600E	35
6.11	Terminales del triac BT136X-600E, NXP [41]	35
6.12	Principio de control de la potencia del triac, NXP [41]	36
6.13	Montaje de Opto-acopladores y triac para el control del serpentín, NXP [41]	37
6.14	Distribución de pines del microcontrolador PIC16F18426, Microchip [42]	38
6.15	Diagrama de bloques del módulo ADC, Microchip [42]	39
6.16	Diagrama de bloques del módulo MSSP I2C Maestro, Microchip [42]	40
6.17	Diagrama de bloques del módulo MSSP I2C Esclavo, Microchip [42]	41
6.18	Configuración resistencias de extracción para comunicación maestro/esclavo, Microchip [42]	41
6.19	Diagrama de bloques módulo CCP en modo de comparación, Microchip [42]	42
6.20	Diagrama de bloques del módulo ZCD, Microchip [42]	43
6.21	Conexiones mínimas recomendadas para el PIC16F18426, Microchip [42]	44
6.22	Conexiones requeridas para el pin MCLR, Microchip [42]	44
6.23	PICkit 3 pinout, Microchip [43]	45
6.24	Esquemático final correspondiente al prototipo desarrollado	46
6.25	Visualización de las pistas situadas en la capa bot y top del prototipo	47
6.26	Vista posterior y anterior del dispositivo fabricado, sin el emplazamiento de los componentes	48
6.27	Prototipo final, montado y ensamblado	48
7.1	Diagrama de flujo del software desarrollado	49
7.2	Conversión analógico-digital de la temperatura, Juan Ignacio Huircán [44]	50
7.3	Configuración del módulo ADC	51
7.4	Función leer para la toma de datos de los pines ADC	52
7.5	Configuración del módulo ZCD	53

7.6	Configuración del módulo CCP	53
7.7	Configuración del módulo Timer1	54
7.8	Configuración de las interrupciones necesarias	55
7.9	Secuencia de escritura del I2C en modo multimaestro, Chris John [45] . .	56
7.10	Secuencia de lectura del I2C en modo multimaestro, Chris John [45] . . .	56
7.11	Configuración I2C del dispositivo esclavo	56
7.12	Estados disponibles para el funcionamiento del protocolo I2C	57
7.13	Máquina de estados de la comunicación I2C	57
8.1	Gráfico de evolución de la temperatura en ensayo al aire	60
8.2	Estado del dispositivo tras el ensayo al aire	61
8.3	Ejemplo de montaje inicial para la prueba del dispositivo en el líquido . .	62
8.4	Gráfica temperatura del experimento con primera configuración, 50W . .	63
8.5	Gráfica temperatura del experimento con segunda configuración, 11W . .	64
8.6	Gráfica temperatura del experimento con segunda configuración, 25W . .	64
8.7	Gráfica temperatura del experimento con segunda configuración, 50W . .	64
8.8	Gráfica temperatura del experimento con tercera configuración, 50W . . .	65
8.9	Gráfica temperatura del experimento con cuarta configuración, 100W . .	65

ÍNDICE DE TABLAS

8.1	Evolución de la temperatura en la evaluación del prototipo al aire	60
B.1	Coste de recursos materiales	
B.2	Coste de recursos de mano de obra	
B.3	Otros gastos	
B.4	Costes totales de elaboración.	

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la demanda de los servicios proporcionados por los centros de datos es muy alta. Son muchos los sectores de la sociedad que los demandan, así como usuarios de todas partes del mundo. Dentro de estos servicios podemos destacar los servicios de vídeo bajo demanda, juegos online, minería de datos, la inteligencia artificial y el uso de IoT (Internet of Things) que requieren de una gran cantidad de datos y capacidad de procesamiento.

De entre ellos, cabe destacar el uso de los recursos de un centro de datos por parte de los dispositivos de comunicación IoT. El IoT consiste en generar la interconexión digital de objetos de uso habitual con Internet; como lo son los relojes inteligentes, domótica, iluminación.... para que se comuniquen entre sí y con los diversos centros de control (centros de datos). De este modo, se pueden procesar los datos que generan y permitir que actúen de manera más inteligente. Según un artículo publicado en IHS Markit [1], en la actualidad se disponen de 23.000 millones de aparatos IoT en conexión y la previsión es que este número aumente hasta los 125 billones para el año 2030 (figura 1.1). Algunos de estos dispositivos, como por ejemplo los ADAS o sistemas de asistencia a la conducción, según el portal AnandTech [2] llegan a generar 4.000 GB de datos al día, alcanzando conexiones de hasta 1 GB/s durante la comunicación.

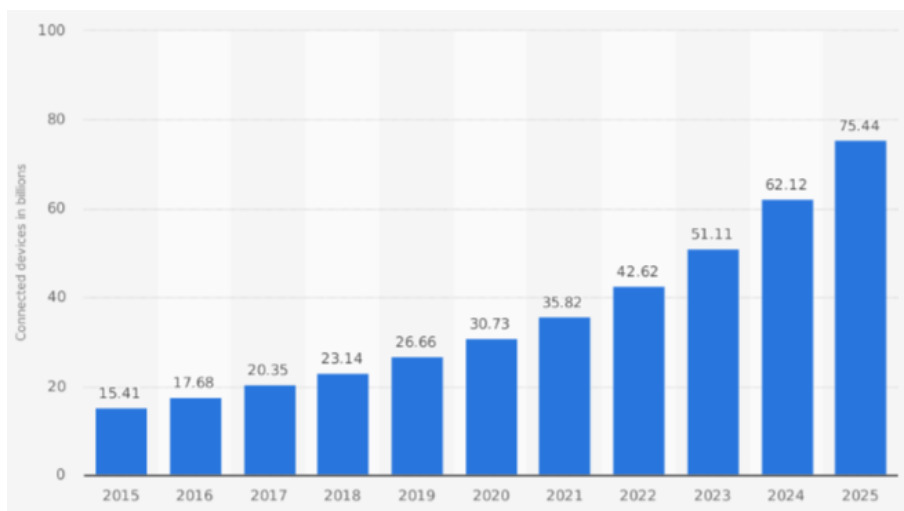


Fig. 1.1. Estimación de la evolución de dispositivos IoT en miles de millones, IHS Markit [1]

Como consecuencia de esta mayor demanda de capacidad de cómputo, los centros de datos destinados a dar estos servicios, están teniendo un gran desarrollo, aumentando de manera considerable el consumo energético.

En un artículo publicado en el MDPI (Multidisciplinary Digital Publishing Institute) por parte del JRC (Joint Research Centre) [3], se estima que los centros de datos generan

un 2 % de las emisiones del CO₂ y consumen alrededor del 2 % de la producción eléctrica generada a nivel mundial[4]. Ligado al desarrollo de los centros de datos, se vuelve prioritaria la tarea del uso eficiente de la energía que se emplea en los mismos, para una mejor administración y optimización de ésta. Para reflejar las cifras que se manejan, en la actualidad el más potente de los centros de datos en el mundo consume 200.000 MWh al año y se tiene la previsión de que en el año 2020 llegue a alcanzar una cuota de consumo similar a la de una central nuclear [5].

Los centros de datos son la base de la entrega de servicios de IT (Information Technology), almacenamiento, comunicaciones y redes para la creciente cantidad de dispositivos, usuarios y procesos de negocios en red que los demandan. El sector de IT consume alrededor del 7 % de la energía eléctrica global empleada en el sector de las tecnologías e información. Este número, constantemente en crecimiento, puede llegar a alcanzar el 13 % para el año 2030 [6].

La creciente necesidad de centros de datos y los recursos que éstos deben proporcionar, han llevado al desarrollo de centros de datos a gran escala, denominados centros de datos hiperescala.

Según Cisco, estos centros de datos hiperescala crecerán en número para el año 2021 como se muestra en la figura 1.2. Representarán el 53 % de todos los servidores de centros de datos instalados para 2021, y representarán el 85 % del servidor de nube pública en 2021, y el 87 % de las cargas de trabajo de nube pública e instancias de cálculo [7].

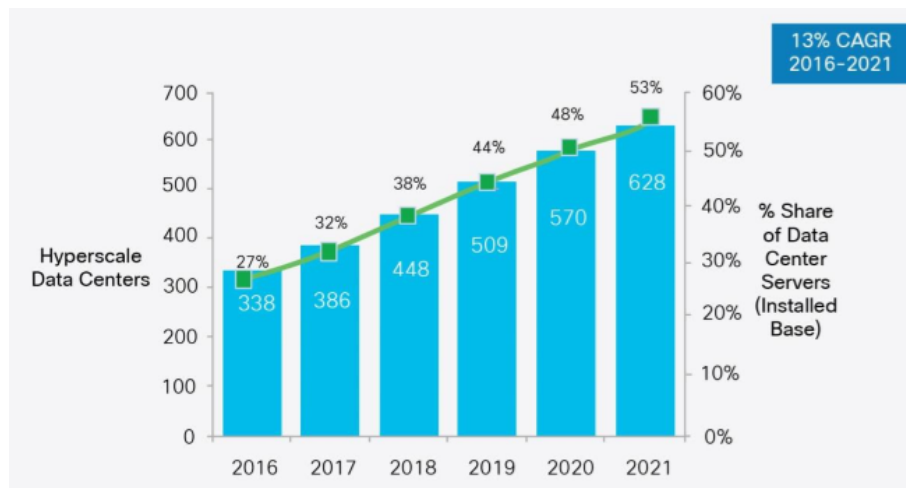


Fig. 1.2. Crecimiento de centros de datos hiperescala, Cisco [7]

Los centros de datos hiperescala ya representan el 39 % del tráfico total dentro de todos los centros de datos, y representarán el 55 % para 2021. Los centros de datos hiperescala también representarán el 65 % de todos los datos almacenados y el 69 % del poder de procesamiento total del centro de datos [7], como se muestra en la figura 1.3.

By 2021, Hyperscale DCs Will Constitute/Support:		Today:
53%	of all data center servers	27%
69%	of all data center processing power	41%
65%	of all data stored in data centers	51%
55%	of all data center traffic	39%

Fig. 1.3. Estimación de los recursos soportados por centros de datos hiperescala para el año 2021, Cisco [7]

En un centro de datos podemos diferenciar las fuentes de consumo de su interior, siendo las más importantes las infraestructuras de computación y procesamiento de datos y las infraestructuras de refrigeración. Las de refrigeración, son necesarias para evitar fallos al alcanzarse una temperatura que pueda dañar los equipos a nivel hardware y provocar una caída del servicio que deje fuera de funcionamiento a todo el sistema. Los porcentajes de consumo estimados son:

- Procesamiento de datos: el 60 % de la energía de los centros de datos se consume en el procesado.
- Refrigeración: se mueve en torno a unos valores del 40 %. Cuanto mayor es el porcentaje, menor es la eficiencia.

Estos porcentajes mostrados son unas aproximaciones de datos aportadas por Cisco [7], pudiendo tener pequeñas variaciones debidas a la presencia de otros sistemas en los centros de datos que, también, tienen un consumo energético, como pueden ser: sistema de alimentación ininterrumpida (SAI), pérdidas de energía en transformadores, sistemas de iluminación y diversos elementos que forman parte de su composición.

El porcentaje de consumo energético de los sistemas de refrigeración es elevado y es un factor importante a la hora de evaluar la eficiencia energética de un centro de datos.

La eficacia del uso de la energía (PUE= Power Usage Effectiveness) es una medida utilizada para determinar la eficiencia energética de un centro de datos. El PUE (figura 1.4), se determina al dividir la cantidad de energía ingresada en un centro de datos entre la potencia utilizada para ejecutar la infraestructura de la computadora dentro de éste, es decir, los equipos de procesamiento de datos [8].

El PUE se expresa como una relación, y la eficiencia general mejora a medida que el cociente disminuye hacia 1. El PUE fue creado por miembros de Green Grid, un grupo industrial enfocado en la eficiencia energética de los centros de datos. La eficiencia de la

infraestructura del centro de datos (DCIE) es el recíproco de PUE y se expresa como un porcentaje que mejora a medida que se acerca al 100 % [8].

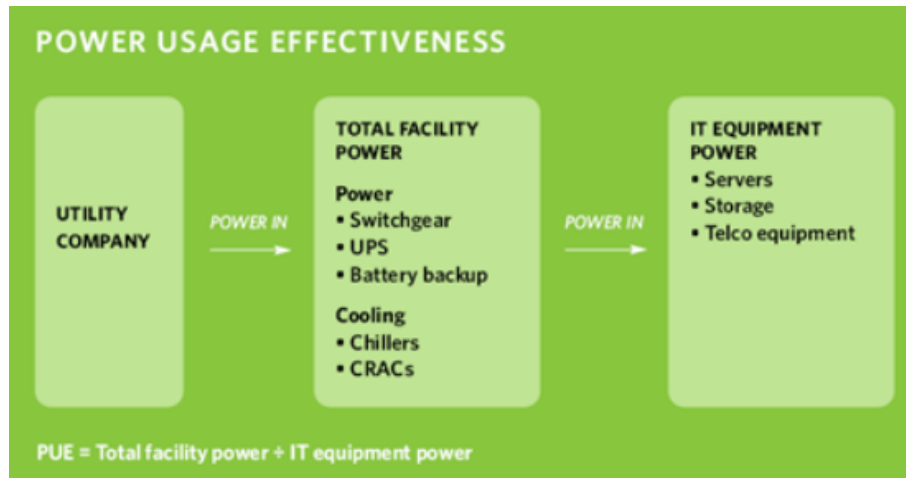


Fig. 1.4. Desglose de la eficacia del uso de la energía, TechTarget [8]

Para obtener un valor concreto del PUE se emplea la ecuación (1.1), referida por The Green Grid [9]:

$$PUE = \frac{\text{Energía de instalación total}}{\text{Energía de equipos IT}} \quad (1.1)$$

Los componentes que aportan energía para estas mediciones, se distribuyen de la siguiente manera:

- **Energía total del sistema:** incluye toda la energía de los equipos IT, así como todos los componentes que usan energía (componentes de suministro de energía, componentes de los sistemas de refrigeración y los sistemas de iluminación).
- **Energía de equipos IT:** en este apartado se incluyen todas las energías asociadas a los equipos de IT, como pueden ser los equipos de cálculo, almacenamiento y equipos de red, así como equipos complementarios.

Cuanto menor sea el valor del PUE más eficiente será el centro de datos. El PUE ideal correspondería a 1. En dicho centro de datos el único consumo se debería exclusivamente a los equipos de IT.

Existen diversas maneras para reducir el valor del PUE [10], como por ejemplo: la localización del centro de datos en zonas frías, mejorar la infraestructura global, ajustar el diseño del centro de datos, aislar el centro de datos, mejorar los servidores, cambios de nivel de UPS (Uninterrupted Power System), mejorar el almacenamiento o diseñar herramientas de manejo y monitorización propias.

En la actualidad el consumo de refrigeración es bastante elevado, siendo uno de los grandes contribuyentes al PUE. Por tanto, se están desarrollando estudios para emplear nuevas técnicas que lo reduzcan drásticamente. Tradicionalmente, los sistemas de refrigeración empleados en los centros de datos, han sido sistemas basados en refrigeración por corrientes de aire [11].

Un breve resumen de los sistemas de refrigeración por corrientes de aire se muestra a continuación, procediendo a su posterior desarrollo en el estado del arte:

- **Pasillo caliente/pasillo frío (Hot Aisle/Cold Aisle):** es un sistema de refrigeración por aire, basado en la distribución de bastidores de servidores, racks, y equipos informáticos en un centro de datos, en filas alternadas con una configuración de pasillo caliente/pasillo frío, cuyo objetivo es conservar la energía y reducir los costes de refrigeración administrando un flujo de aire [12].
- **Contención de pasillo frío (Cold Aisle Containment):** este método es una evolución del pasillo caliente/pasillo frío. Consistente en el cerramiento del pasillo frío (figura 1.5) mediante barreras de metal, plástico o flexiglás, para mejorar el rendimiento de la refrigeración [13].

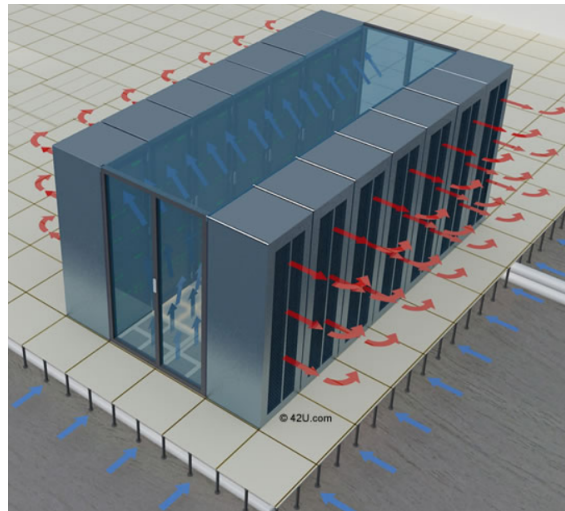


Fig. 1.5. Sistema de refrigeración de pasillo frío, 42U [13]

- **Contención de pasillo caliente (Hot Aisle Containment):** la contención de pasillo caliente captura inmediatamente el aire de escape del servidor y restringe su entrada al resto del centro de datos. El destino del aire de salida depende de la configuración de contención [14].
- **Ventilación natural mecánica (Free-cooling):** es un sistema de refrigeración novedoso en el que se emplea el entorno natural al aire libre, para reemplazar el aire acondicionado mecánico [15]. Puede combinarse con el resto de sistemas. El factor geográfico tiene un gran impacto sobre él.

Debido a la ineficiencia de estos sistemas, su gran consumo y elevado coste, algunos de los sistemas de refrigeración más actuales emplean la refrigeración líquida [16].

Ahora se mostrará de forma escueta los sistemas de refrigeración líquida, haciendo mayor hincapié en ellos más adelante:

- Refrigeración con agua (Water Cooled Racks and Servers): se basa en la colocación de un sistema de tubos, en el interior de los servidores, por los que fluye el agua en su interior para realizar el intercambio de calor con los componentes. Es una técnica que implica riesgos, ya que la existencia de una fuga, deja inoperativo el servidor [17].
- Refrigeración por inmersión indirecta: mediante el uso de líquidos dieléctricos, se consigue evitar el problema principal del agua, debido a que podrían entrar en contacto con los equipos. Mediante esta técnica, el líquido refrigerante nunca entra en contacto con los componentes y hace que este enfoque sea menos eficiente.
- Refrigeración por inmersión directa: sistema de refrigeración en el que el líquido refrigerante entra en contacto directo con los dispositivos. Se pueden diferenciar dos técnicas de empleo:

Refrigeración líquida por inmersión en baño abierto monofásico: el líquido refrigerante no cambia de estado durante el proceso.

Refrigeración líquida por inmersión en dos fases, cerrada o semiabierta: el líquido refrigerante durante el proceso cambia de líquido a gas y vuelve a fase líquida en un circuito constante, un ejemplo de configuración se muestra en la figura 1.6.

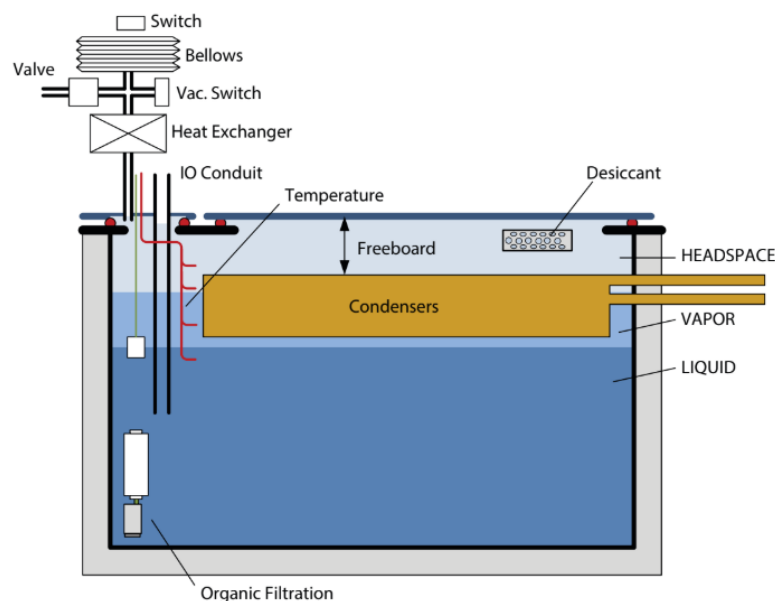


Figure 2. Two-Phase Immersion Cooled Tank set-up

Fig. 1.6. Ejemplo de configuración de tanque de inmersión en dos fases, 3M [18]

Los sistemas de refrigeración líquida ofrecen enormes ventajas respecto a los sistemas de refrigeración por corriente de aire empleados tradicionalmente. En la actualidad, dentro de los líquidos de refrigeración disponibles, los líquidos dieléctricos han probado tener una mayor capacidad de arrastre de calor y, por tanto, tienen el potencial para producir una reducción drástica del consumo en refrigeración. Para ello, habrá que realizar un estudio previo de las características del fluido refrigerante a emplear y, de este modo, aplicarlo de la manera más efectiva posible y explotar todo su potencial.

En este trabajo mediante el desarrollo y diseño de unos prototipos con un bloque calefactor (generador de calor), bloque de sensado (toma de datos) y bloque de control (global y de corriente), nos centraremos en la implantación de un sistema que sirva para la generación controlada de calor, dedicado a estudiar los límites de funcionamiento de un líquido refrigerante denominado hidro-fluoro-éter (HFE), con el objetivo de determinar la curva característica del líquido empleado, si se dispone de la potencia suficiente para su estudio. Este fluido refrigerante, denominado Novec 7100, tiene la propiedad de ser dieléctrico y es fabricado por la empresa 3M [19]. Este líquido dieléctrico de transmisión de calor supone una revolución en el sistema de refrigeración de servidores o centros de datos en la actualidad.

El Novec 7100 es un disolvente orgánico, introducido como sustituto de productos dañinos contra la capa de ozono, como los productos CFC (clorofluorocarbonos), HFC (hidrofluorocarburos) y HCFC (hidroclorofluorocarbonos).

Anteriormente a su utilización como líquido refrigerante, en la década de 1950, 3M empezó a usar el 3M Fluorinert Electronic Liquids para aplicaciones con demanda de calor en diversos sectores: aviación militar, superordenadores, controladores de potencia...[20]. También se empleó para extinción de incendios en ambientes en los que el agua podría dañar elementos; o la limpieza de equipos electrónicos, debido principalmente a su capacidad de contacto directa con elementos eléctricos y electrónicos.

Las características del líquido proporcionadas por el fabricante [21] son las siguientes:

- Estado líquido a temperatura ambiente
- Bajo índice de GWP (Global Warming Potencial).
- Baja viscosidad y tensión superficial
- Compatible con plásticos
- Baja toxicidad, no inflamable
- Incoloro, inodoro

El fabricante asegura mediante la implementación de un sistema de refrigeración líquida de su producto una serie de ventajas, como la reducción de costes de refrigeración,

el aumento de la densidad de potencia admitida por rack y la disminución de los valores PUE del centro de datos en el que se aplique.

En este trabajo mediante la inmersión de los prototipos en él y la toma de datos de temperatura provenientes de ellos, el objetivo es conseguir parametrizar la capacidad de arrastre del fluido en función de la temperatura. El fabricante, mediante sus cálculos teóricos, proporciona la siguiente figura 1.7:

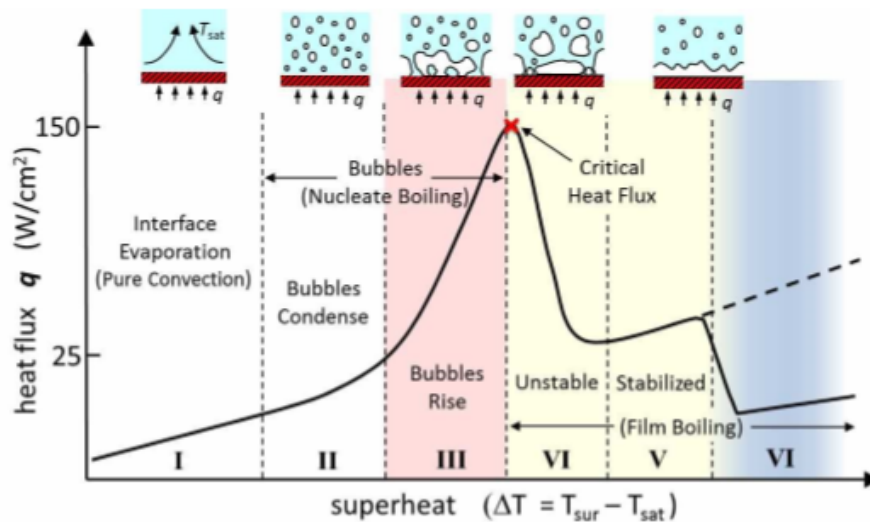


Fig. 1.7. Arrastre de calor teórico en función de la temperatura, cedida por 3M

En el valor mostrado entre la sección III y IV, teóricamente, el calor proveniente del elemento calefactor que forma parte del prototipo, generará tal nivel de burbujas, que el prototipo quedará al aire y se verá afectado por el contacto con el aire, que es un elemento que no es capaz de disipar el calor necesario para garantizar su correcto funcionamiento.

Las fases del trabajo a realizar son las siguientes:

- Determinación de los requisitos del estudio.
- Diseño y desarrollo del prototipo físico (hardware).
- Desarrollo del software de control (corriente y global).
- Evaluación del prototipo en aire y en el líquido.

1.1. Marco regulador

El desarrollo del estudio se realiza bajo la legislación y los estándares vigentes.

1.1.1. Legislación

- De conformidad con el artículo primero del Real Decreto Legislativo 1/1996 de la propiedad intelectual, los programas informáticos Orcad Capture CIS y MPLAB X IDE para la elaboración del estudio, la propiedad intelectual y autoría de los mismos pertenecen a las empresas desarrolladoras Cadence y Microchip[22].
- De conformidad con el artículo 10.1 del Real Decreto Legislativo 1/1996 de la propiedad intelectual, los programas informáticos Orcad Capture CIS y MPLAB X IDE, como obra literaria, están protegidos (incluidos en la lista no exhaustiva de obras protegidas) [22].
- De conformidad con el artículo 96.1 del Real Decreto Legislativo 1/1996 de la propiedad intelectual, los programas informáticos quedan protegidos en cualquiera de sus expresiones posibles (código fuente y código objeto) y en su totalidad (interfaces de uso) [22].
- De conformidad con el Real Decreto 822/1993 el desarrollo de los estudios en el laboratorio se realizan aplicando BPL (Buenas Prácticas de Laboratorio) [23].

1.1.2. Estándares

- El desarrollo del software, en lenguaje C, se hace en base a la normativa ISO 639, estándar internacional para códigos de idioma [24].
- La construcción y diseño del prototipo empleado se ejecuta conforme al estándar genérico en diseño de placas IPC-2221 [25].

2. MOTIVACIÓN

Debido al incremento de aplicaciones en diversos ámbitos que requieren de una elevada capacidad de cómputo, la creación de nuevos centros de datos ha sufrido un incremento potente que compromete una gran cantidad de servidores, para ofrecer soporte a un gran número de usuarios.

Estos centros de datos proveen los recursos necesarios para la ejecución de múltiples servicios y aplicaciones en la sociedad actual (correo electrónico, servicios de voz, procesamiento de datos, servicios de geolocalización, comunicación trunking...). Estos servicios y aplicaciones tienen una alta demanda por parte usuarios y empresas. Están en continuo desarrollo, lo que nos lleva a disponer de nuevas tecnologías (procesadores más pequeños, sistemas de almacenamiento y lectura de datos, seguridad informática, desarrollo de software...), que necesitan de una alta cantidad de procesamiento de datos. La necesidad de garantizar el procesamiento de datos de manera efectiva y el constante crecimiento de recursos de computación, ha dado lugar a la necesidad de creación de nuevos centros de datos.

Los centros de datos se han basado durante mucho tiempo en proporcionar una alta velocidad y rendimiento del transporte de datos. La mejora de los sistemas relacionados con la velocidad de procesamiento de datos y, el rendimiento del centro, conllevan a la mejora de los componentes electrónicos que forman parte de dichos equipos: frecuencia de funcionamiento del procesador, número de procesadores por sistema, incremento del número de transistores por procesador..., aumentando significativamente la potencia requerida por estos centros de datos, necesitando de una gran cantidad de suministro eléctrico y generando calor.

El desarrollo de nuevos sistemas, basado en la mejora del rango de velocidad de procesamiento de datos y rendimiento, degrada de manera proporcional la eficiencia energética de dichos centros de datos. Este hecho no es sostenible y genera la necesidad de mejorar la eficiencia energética mediante nuevos sistemas de refrigeración, capaces de soportar las necesidades del centro de datos (suministro eléctrico, generación de calor, rendimiento...).

Este trabajo de fin de grado propone diseñar y desarrollar un prototipo que permita llevar a cabo los estudios pertinentes de los hidro-fluoro-éteres para caracterizar su curva característica, obtener su punto óptimo de funcionamiento y establecer los límites de operación. Una vez realizado este estudio, se podrán aplicar los resultados obtenidos para diversas aplicaciones, como puede ser la mejora de la eficiencia térmica y energética de los centros de datos.

3. OBJETIVO

El objetivo de este trabajo fin de grado se basa en el desarrollo de un prototipo que genere calor de forma controlada, permitiendo la evaluación de los límites de operación y la obtención de la curva característica de un líquido refrigerante con propiedades dieléctricas denominado Novec 7100, desarrollado por la marca 3M.

En un principio, las aplicaciones de este líquido eran muy distintas a las que se les pretende dar en la actualidad, por lo que, mediante la creación y desarrollo de un prototipo se pretende estudiar el comportamiento del líquido para futuras aplicaciones.

En la actualidad los servicios y aplicaciones que requieren del uso de centros de datos están creciendo a un ritmo muy alto, demandando unas mayores capacidades de cómputo y procesamiento día a día. Uno de los aspectos fundamentales para el correcto funcionamiento de los centros de datos se basa en los sistemas de refrigeración de los equipos de IT que en ellos se encuentran. Los sistemas tradicionales de refrigeración por corrientes de aire resultan ineficientes e insuficientes ante estas necesidades de servicio, por ello en la actualidad se está apostando por sistemas de refrigeración líquida.

La proliferación de los sistemas de refrigeración líquida, justamente, nos lleva al uso del líquido a estudiar en ellos, debido a que sus características fundamentales resultan ideales para su aplicación. En especial, la capacidad del líquido de estar en contacto directo con equipos eléctricos y electrónicos sin provocar fallos en su funcionamiento.

El desarrollo y diseño del prototipo debe de ajustarse a las necesidades del estudio y, emular un procesador de un equipo de IT. Estos prototipos permiten calentar el líquido de una forma controlada y, tienen un coste considerablemente menor frente a la inmersión directa de equipos IT. De los prototipos se podrán obtener los datos de temperatura y una estimación de la potencia consumida necesarios para parametrizar la curva que caracterizará el comportamiento del líquido. Dichos datos se inyectarán en un sistema externo que permita su visualización. Por ello debe de componerse de cuatro bloques fundamentales:

- Bloque calefactor: para emular un procesador y generar calor.
- Bloque de sensado: para la toma de datos analógicos de temperatura.
- Bloque de comunicación: para establecer un protocolo para la comunicación con el sistema de visualización de datos exterior. El sistema de visualización de datos exterior, Collectd y Grafana, es proporcionado por el grupo de investigación GreenLSI.
- Bloque de control: para controlar el paso de corriente por el prototipo y gobernar todo el funcionamiento.

Mediante la inmersión de los prototipos en el líquido a estudiar, se inicia la toma de datos del fluido y se procederá a la parametrización de la curva característica del fluido.

Una vez tengamos acotados los valores de la curva, seremos capaces de establecer unos límites de funcionamiento que no se han de sobrepasar para el correcto funcionamiento de los equipos inmersos en el líquido, así como el punto óptimo de funcionamiento en el que el rendimiento de los equipos sea el máximo.

4. ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se describen las técnicas de refrigeración que se emplean en los centros de datos, tanto por sistemas de corrientes de aire, como por sistemas de refrigeración líquida. El objetivo de esta descripción, es entender el beneficio de la refrigeración líquida frente a otros sistemas de refrigeración y, así, poder mejorar la eficiencia energética y los consumos generados.

4.1. Refrigeración por aire

Se procede a explicar más detalladamente, en esta sección, los sistemas de refrigeración por corrientes de aire, brevemente presentados en el capítulo de introducción. Tradicionalmente, estos sistemas de refrigeración han sido empleados en los centros de datos.

4.1.1. Pasillo caliente/Pasillo frío (Hot Aisle/Cold Aisle)

El pasillo caliente/pasillo frío sigue siendo una de la principales técnicas de refrigeración empleadas para los centro de datos. Este sistema, concebido por Robert Sullivan del Uptime Institute, hace uso de aires acondicionados, ventiladores y pisos elevados, estableciendo una infraestructura de enfriamiento y enfocada en la separación de los flujos de aire, la entrada de aire frío por un lado y el escape de aire caliente por otro [26].

Los racks de servidores están distribuidos en una serie de filas, que se encuentran sobre un piso elevado. Las partes frontales de los bastidores se enfrentan entre sí y así se consigue generar pasillos fríos, debido a que la mayoría de equipos IT tiene una disipación de calor frontal-posterior. En la figura 4.1 se muestra un ejemplo de la disipación de calor de un rack de Oracle [27].

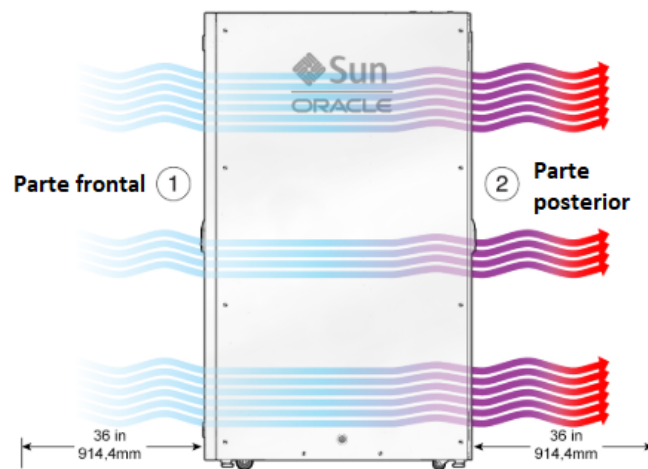


Fig. 4.1. Disipación de calor frontal-posterior equipos IT, Oracle [27]

Los equipos de aire acondicionado de sala de ordenadores (CRAC) o manipuladores de aire de sala de ordenadores (CRAH), se sitúan a lo largo del perímetro de la sala o al final de los pasillos calientes. Su función consiste en empujar el aire frío que circula por debajo del suelo elevado y por el pasillo frío.

Las baldosas de suelo elevadas perforadas se sitúan únicamente en los pasillos fríos, de esta manera, se concentra el aire fresco en la parte delantera de los racks para obtener suficiente aire para la entrada del servidor. Los servidores han de tener la entrada orientada hacia la parte frontal del rack y el escape hacia la parte posterior. A medida que el aire circula a través de los servidores se calienta, para acabar disipándose en el pasillo caliente. El aire de escape es nuevamente dirigido a los manipuladores de aire.

La capacidad de eliminar calor está influenciada por varios factores, como son: altura del piso elevado, colocación y perforación de los azulejos, ubicación de los equipos de aire y de la sala. Es necesaria la implementación de un diseño integral y sólido.

Todos los elementos deben trabajar en conjunto para mantener el centro de datos. Un ejemplo de distribución de este sistema se puede observar en la figura 4.2.

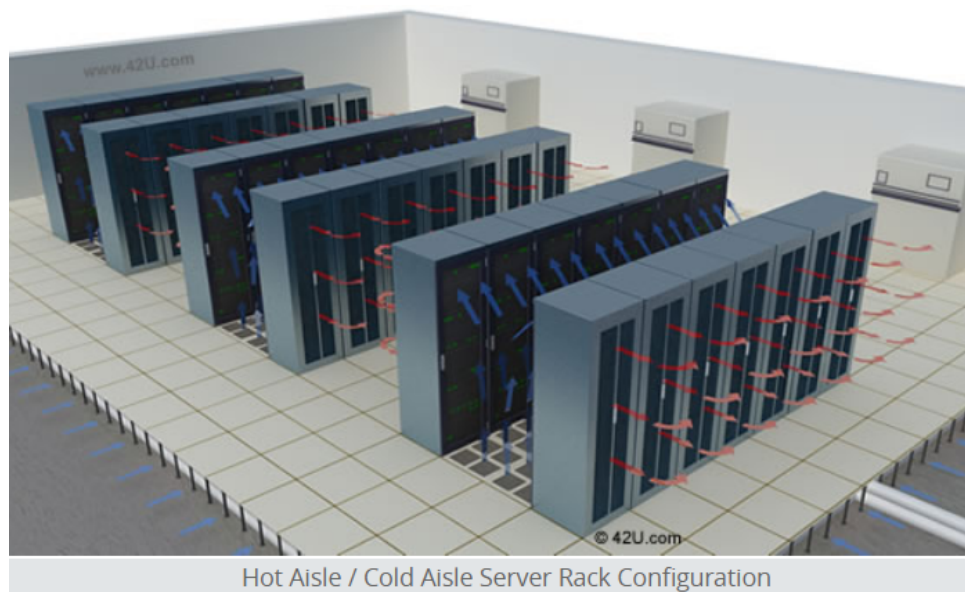


Fig. 4.2. Ejemplo distribución sistema de refrigeración pasillo caliente/pasillo frío, 42U [26]

4.1.2. Contención de pasillo frío (Cold Aisle Containment)

Este sistema de refrigeración es una evolución del sistema pasillo caliente/pasillo frío, consistente en el cerramiento del pasillo frío. De este modo, el pasillo frío se convierte en una habitación por sí mismo. El cerramiento se realiza a través de barreras de metal, plástico o plexiglás [13].

El sistema pasillo caliente/pasillo frío, resulta insuficiente para entregar un volumen de aire frío a los equipos cuando la densidad de racks aumenta, así como para mover el aire de escape a los equipos manipuladores de aire. Mediante el empleo del sistema de

contención de pasillo frío se puede mejorar el rendimiento de la refrigeración.

Debido a la disposición abierta de los centro de datos, con el pasillo caliente/pasillo frío no se puede conseguir una separación de los flujos de aire total. Con el cerramiento o aislamiento del pasillo frío, el aire frío procedente desde debajo del suelo permanece en la entrada del servidor. El cerramiento garantiza que el aire salga a través del rack. El aire de salida circulará hacia los manipuladores de aire, evitando así la mezcla de flujos de aire. A continuación se muestra en la figura 4.3 un diagrama de funcionamiento del sistema de contención del pasillo frío, obtenido del blog *aodbc* [28].

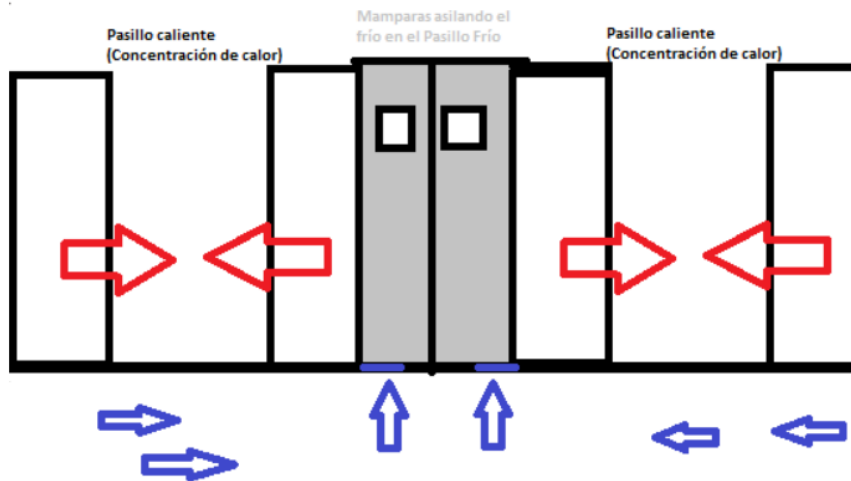


Fig. 4.3. Diagrama de funcionamiento contención pasillo frío, blog *aodbc* [28]

4.1.3. Contención de pasillo caliente (Hot Aisle Containment)

El sistema de contención de pasillo caliente, se basa en la captura inmediata del aire que escapa del servidor y, restringe la entrada de éste a las demás partes del centro de datos. El destino del aire de salida dependerá de la configuración de contención que se instale. En la figura 4.4 se muestra un diagrama de funcionamiento proporcionado por el blog *aodbc* [28].

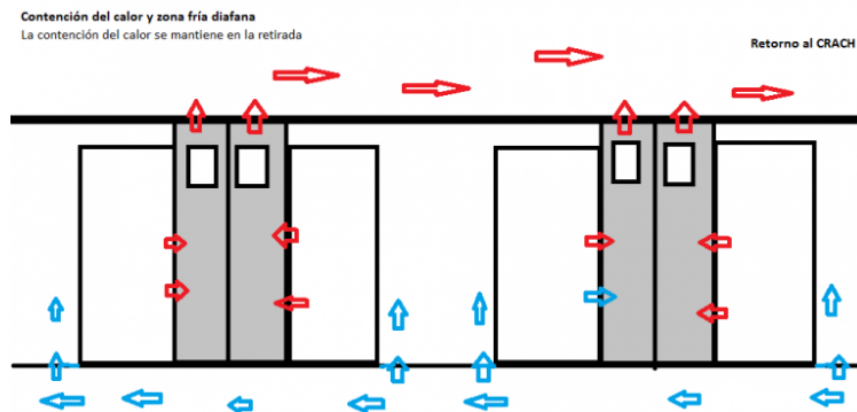


Fig. 4.4. Diagrama de funcionamiento contención pasillo caliente, blog *aodbc* [28]

Se dispone de dos configuraciones posibles para la contención del pasillo caliente[14]:

- Contención de la sala: consistente en el cerramiento, mediante paneles, del pasillo caliente convirtiéndolo en una habitación por sí mismo. Se procede a la instalación de un acondicionador de aire en hilera, cuya función es la de capturar el aire de escape proveniente de los equipos, acondicionarlo y devolverlo al pasillo frío.
- Contención de la chimenea: este tipo de contención implica la construcción de gabinetes de servidor especializados que contengan una puerta trasera, conductos (llamados chimeneas) y un falso techo. Los conductos, van conectados a la parte posterior de los gabinetes para recoger aire de escape de los servidores y dirigirlo hacia un falso techo. Este falso techo entrega el aire caliente a un equipo de aire acondicionado situado en el perímetro.

4.1.4. Ventilación natural mecánica (Free cooling)

Este sistema de refrigeración se basa en emplear el aire de un lugar, especialmente frío, para la climatización de los centros de datos.

El aire que se encuentra en el ambiente externo es, en muchas zonas geográficas, muy frío. Se trata de filtrar y humidificar ese aire externo más frío para su aplicación directa en los centros de datos, reduciendo o incluso eliminando el uso de enfriamiento mecánico. La refrigeración mecánica sólo sería empleada cuando el aire exterior alcance temperaturas en las que su uso ya no sea efectivo; de este modo, la vida útil de los sistemas de refrigeración mecánicos instalados se extiende en el tiempo [29].

La reducción del sistema de enfriamiento mecánico también implica una reducción de la energía de consumo del centro de datos y del mantenimiento para las instalaciones.

Si las condiciones climáticas de la zona geográfica en la que se instale el centro de datos permiten el uso continuo del aire exterior, los sistemas de enfriamiento mecánico podrían eliminarse por completo. En la figura 4.5 mostrada a continuación, se presenta un ejemplo de distribución de un centro de datos de ventilación natural mecánica [30].

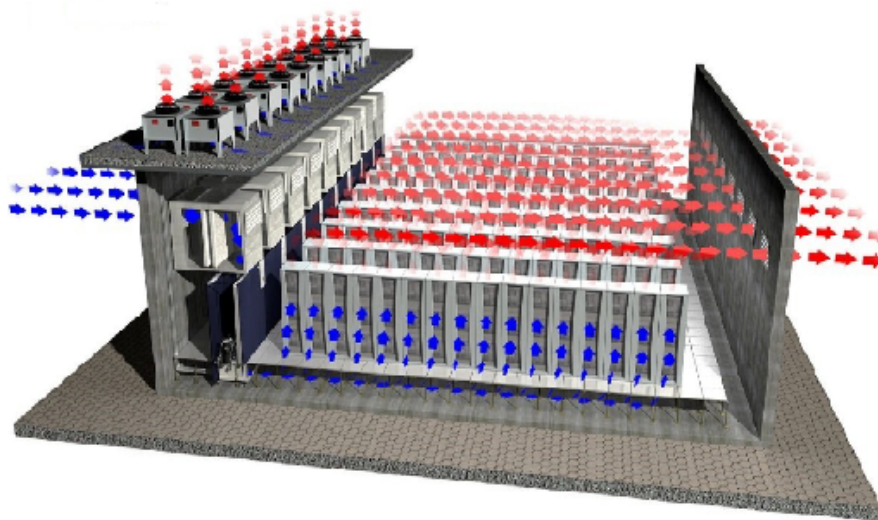


Fig. 4.5. Centro de datos de ventilación natural mecánica

La refrigeración natural mecánica, o free cooling, es algo bastante novedoso como uso para el enfriamiento de los centros de datos. Sin embargo, esta tecnología está creciendo rápidamente, y los propietarios de los centros de datos más grandes del mundo, como Google, Facebook o Microsoft, han estado construyendo nuevos centros de datos con refrigeración natural mecánica [31].

4.2. Refrigeración líquida

En la actualidad, la instalación de centros de datos se está llevando a cabo mediante sistemas de refrigeración líquida, debido a su mayor capacidad de transferencia de calor con respecto a la refrigeración por corrientes de aire. Según el desarrollador Chilldyne [32], el uso de la refrigeración líquida proporciona las siguientes ventajas:

- Reduce en un 75 % la potencia del HVAC [H (heating, calefacción), V (Ventilating, ventilación) AC (air conditioner, aire acondicionado)].
- Reduce en un 75 % la potencia de ventilación necesaria.
- Reduce un 5 %-10 % la potencia de la CPU.

Tal y como se muestra en la figura 4.6, los sistemas de refrigeración líquida, reducen en un 45 % la potencia de refrigeración necesaria respecto a los sistemas convencionales de refrigeración por corrientes de aire.

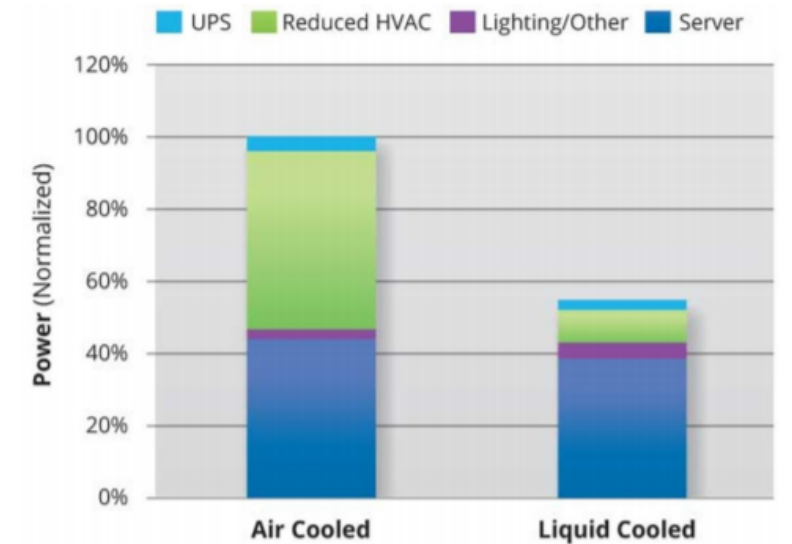


Fig. 4.6. Comparativa de potencia y costes de refrigeración líquida respecto a la refrigeración por corrientes de aire, Chilldyne [32]

4.2.1. Refrigeración con agua

Existen varias técnicas de refrigeración por agua que se emplean en la actualidad:

- CRAH (Computer Room Air Handler): se basa en un sistema para tratar el calor producido por los equipos, mediante un dispositivo controlador de aire para la sala del centro de datos. A diferencia de los equipos CRAC de aire acondicionado, utilizan ventiladores, serpentines y otros sistemas de enfriamiento con agua para la eliminación de calor [33] (figura 4.7).

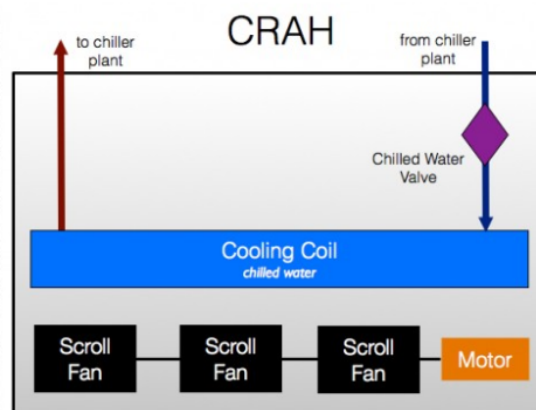


Fig. 4.7. Sistema de refrigeración CRAH, Dan Mascola [33]

- InRow Chilled Water: el sistema de InRow acerca la refrigeración a la carga de calor de los equipos y dispositivos IT (figura 4.8). El acercamiento evita que el aire caliente vuelva a circular, esto provoca mejoras en la capacidad de refrigeración

del centro de datos [34]. Requieren de aislamiento pasillo caliente/pasillo frío para alcanzar los rendimientos máximos.

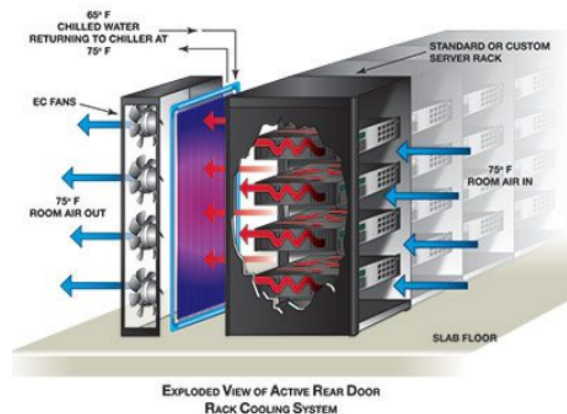


Fig. 4.8. Sistema de refrigeración InRow, Developers Club [35]

Los sistemas de refrigeración por agua, presentan desventajas notables respecto a las refrigeraciones líquidas mediante el uso de fluidos dieléctricos. Una fuga en un sistema de refrigeración por agua puede dejar inhabilitados los equipos, mientras que los fluidos dieléctricos pueden entrar en contacto directo con los equipos y disipar una mayor densidad de potencia.

4.2.2. Refrigeración por inmersión indirecta

Mediante el uso de un líquido dieléctrico, se consigue evitar la inutilización de los equipos por contacto en caso de fugas. El uso de esta técnica no aprovecha al 100 % el potencial de los fluidos, con lo que se pierde eficiencia.

4.2.3. Refrigeración por inmersión directa monofásica

En esta técnica se emplean únicamente líquidos dieléctricos, los cuales se han de encontrar en constante movimiento y arrastrar el calor que se genera en los equipos IT del centro de datos, situados en el interior de un tanque. Circulan por el interior del sistema a baja presión e índices de flujo utilizando mangueras, tuberías, radiadores estándar, refrigeradores secos o intercambiadores de calor.

Los líquidos empleados en esta técnica no hierven ni sufren cambios de fase durante el proceso de enfriamiento. Esto elimina la presión, humos, vapores y corrosión, debidos a la transición del cambio de estado de un refrigerante de líquido a gas. [36].

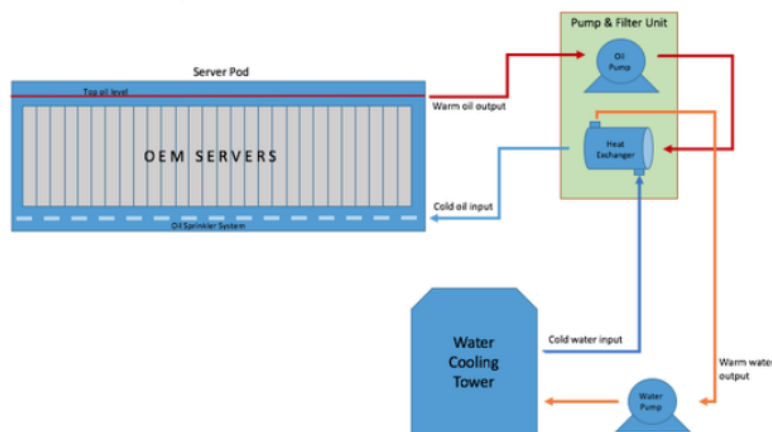


Fig. 4.9. Refrigeración por inmersión directa monofásica, Revolv [37]

Como se observa en la figura 4.9, este sistema requiere del uso de dispositivos externos auxiliares, cuya función es enfriar el fluido antes de volver a recorrer el tanque de refrigeración.

4.2.4. Refrigeración por inmersión directa en dos fases

Para la inmersión líquida de los centros de datos, el fabricante 3M propone una inmersión en dos fases (2PIC). Utilizando el líquido transmisor de calor 3M Novec, se garantiza un incremento significativo de densidad de potencia, reduciendo la energía consumida siendo medioambientalmente sostenible. El fluido refrigerador tiene la ventaja de tener un punto de ebullición relativamente bajo y, por ello, cambia de fase. Con el uso de esta tecnología se pueden conseguir buenos rangos de eficiencia energética[18].

En la figura 4.10 se observa que la inmersión líquida con el 3M Novec, mediante la técnica de inmersión en dos fases, presenta ciertas ventajas con respecto a la refrigeración por aire convencional.

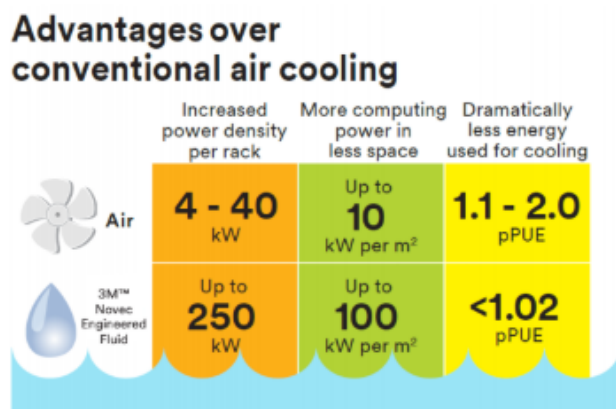


Fig. 4.10. Ventajas de la refrigeración por inmersión directa en dos fases, 3M [20]

En la figura 4.10 mostrada, se remarcen las principales ventajas con respecto a los sistemas de refrigeración por aire empleados hasta el momento. Se detallan tres aspectos notables:

- Aumento de la densidad de potencia: de un máximo de 40kW mediante la refrigeración por aire hasta 250kW (suponiendo un incremento de un 625 %).
- Mayor capacidad de computación en menor espacio: pasando de procesar 10kW/m³ a 100 kW/m³ (incremento del 1000 %).
- Mejora de la eficiencia energética: de un PUE situado entre 1.1/2 a uno menor de 1.02.

5. ESPECIFICACIONES

En este capítulo, para la elaboración de un prototipo apropiado al estudio a realizar, se explicarán los requisitos que debe cumplir nuestro diseño.

Para la evaluación del líquido refrigerante, se requiere del diseño y construcción de un sistema como se muestra en la figura 5.1. Dicho sistema será capaz de funcionar y tomar las medidas, mediante un prototipo, en unas condiciones de temperatura determinadas (las del líquido en que se encuentre sumergido), manteniendo un control global del sistema general, un control individual de la temperatura, así como dispondrá de un medio de comunicación con el exterior, en el que se encontrará un dispositivo capaz de almacenar los datos recibidos. También será necesario disponer de un equipo de visualización, capaz de recibir y mostrar los datos almacenados de modo que cualquier usuario pueda acceder a ellos para su posterior estudio.

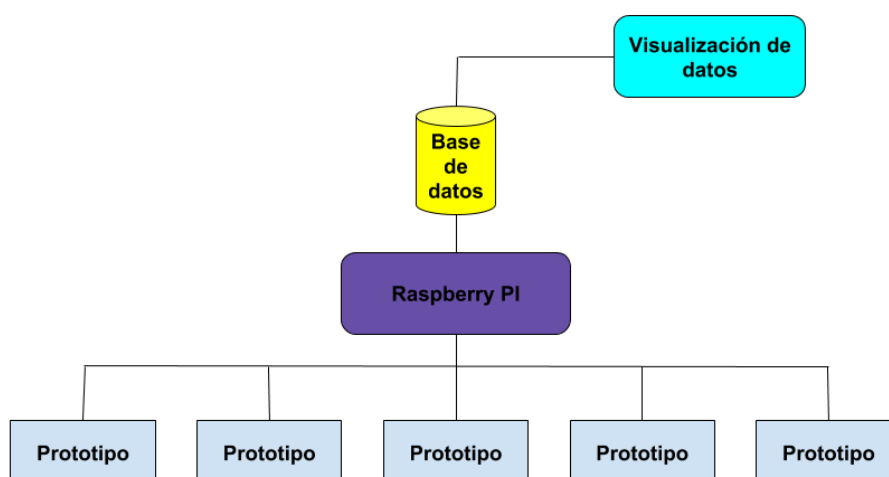


Fig. 5.1. Diagrama general del sistema

El bloque, que se corresponde al prototipo mostrado en la figura 5.1, es el elemento del sistema que se procede a diseñar para realizar el estudio. Habrá de cumplir con las especificaciones y requerimientos del sistema. La construcción y desarrollo de este prototipo, están dedicados exclusivamente a este estudio. Dicho dispositivo deberá poder ser sumergido en el líquido y ser capaz de aguantar las temperaturas a alcanzar durante el estudio.

Se plantea un prototipo compuesto por cuatro bloques principales (como se muestra en la figura 5.2). Cada uno de los bloques viene identificado por un color determinado, y está destinado a una labor específica para el estudio. Los bloques requeridos del prototipo a diseñar son los siguientes:

- Bloque calefactor (Naranja)
- Bloque de sensado (Rosa)
- Bloque de comunicación (Gris)
- Bloque de control (Azul)

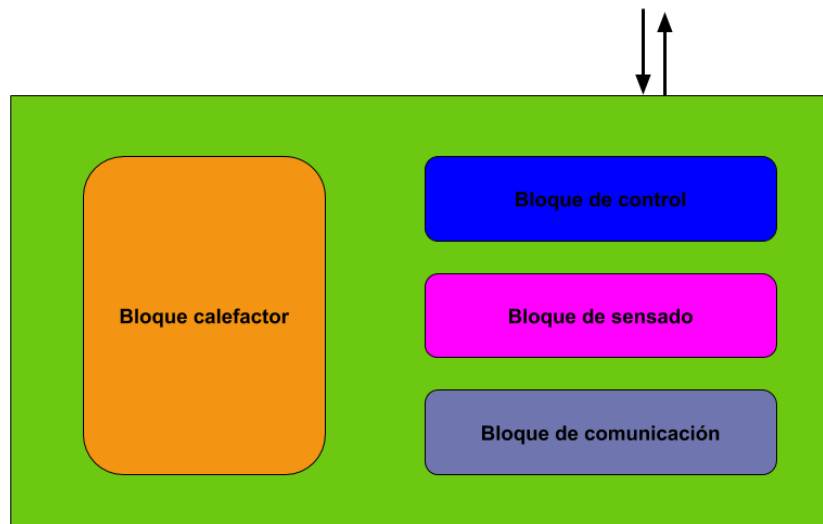


Fig. 5.2. Prototipo y bloques que lo componen

En la próxima sección del capítulo, se procederá a explicar los requisitos específicos de los bloques que conforman el prototipo requerido.

5.1. Requisitos

5.1.1. Bloque calefactor

El bloque calefactor del prototipo ha de ser una superficie que emule un procesador, que permita generar calor hasta alcanzar unas temperaturas definidas y adecuadas para el estudio a realizar a partir de una alimentación de corriente, que permita su funcionamiento y regulación.

Con el objetivo de llegar a evaluar el límite de operación del líquido dieléctrico (para su posterior utilización en sistemas de refrigeración), es necesario establecer una temperatura de evaluación del sistema. Los sistemas de computación están basados en equipos electrónicos, cuyos componentes interiores están diseñados para obtener su máximo rendimiento en unas condiciones de temperatura adecuadas. Una vez alcanzadas dichas temperaturas, los sistemas comienzan a sufrir. Esta temperatura suele rondar los 90°C, con lo que los componentes de nuestro prototipo (pistas, sensores...) deberán poder alcanzar, como mínimo, una temperatura de 90°C.

Para realizar el análisis de los límites de operación, se establece como requisito, una temperatura mayor para ver el comportamiento de los componentes que forman parte del prototipo. Se decide poner como requisito una temperatura de 100°C para el análisis. Esta temperatura de evaluación del sistema ha de ser variable a partir de la regularización de la corriente que proviene de la alimentación del bloque.

La alimentación del bloque calefactor se llevará a cabo mediante un transformador, el cual, suministra una corriente de 2A y un voltaje de 12V eficaces. Las características propias de la alimentación llevan implícitas unas restricciones, que han de tenerse en cuenta a la hora del diseño hardware del bloque.

5.1.2. Bloque de sensado

Para llevar a cabo todas las mediciones, es necesaria la elección de dispositivos que sean capaces de funcionar de manera correcta en el rango de temperaturas que se establecen, es decir, los dispositivos deben poder funcionar entre al menos 25°C-100°C de temperatura.

Debido a la limitación física del espacio, los dispositivos de sensado, no han de tener unas grandes dimensiones, para no aumentar de manera excesiva el tamaño del prototipo final. El propósito de la reducción de tamaño es el de poder incluir en su interior un número suficiente para realizar un estudio veraz. Estos dispositivos se distribuyen de manera estratégica a lo largo del prototipo para ser capaces de tomar datos de temperatura de todas las zonas y, especialmente, de aquellas zonas que, o bien van a alcanzar mayores temperaturas (bloque calefactor), o donde se encuentran componentes destinados a la toma de datos y establecimiento de la comunicación exterior (bloque de control y bloque de comunicación).

A su vez, los dispositivos de sensado, han de tener unas características que les permitan estar en contacto de manera directa con el líquido, puesto que van a ser sumergidos en él a la hora de realizar el estudio.

5.1.3. Bloque de control

Dentro de este bloque, procederemos a distinguir dos controles encargados de la ejecución de labores distintas, estos bloques son los siguientes:

- Control de corriente
- Control global del prototipo

Control de corriente

Se establece un control de corriente para que, mediante la regulación de la misma, se pueda ejercer un control de la temperatura en el bloque calefactor, y así poder regularla permitiendo el paso, o no, de corriente durante determinados períodos de tiempo.

Para la ejecución de este control, será necesario aislar las alimentaciones mediante el uso de dispositivos ópticos. Situados de manera que reciban el voltaje y la corriente proporcionados por la alimentación del bloque calefactor, funcionan como un interruptor que permite el paso de corriente durante un periodo determinado para el aumento de temperatura, así como para mantenerla o descenderla.

Control global del prototipo

El control global del prototipo ha de ser llevado por un dispositivo programable al que implementarle un software previamente diseñado, como lo puede ser un microcontrolador. El dispositivo seleccionado ha de tener las características físicas necesarias para el sistema (número de pines suficientes para establecer todas las conexiones físicas que requiere el sistema), así como, poder comunicarse y ser interpretado mediante el protocolo definido para la comunicación de datos con el exterior y entre los dispositivos de control.

El software diseñado, ha de configurar un dispositivo, para ser capaz de comunicar y tomar los datos de todos los dispositivos del bloque de sensado y, almacenar todas las direcciones distintivas de los dispositivos de control y mandar las señales de gobierno del sistema de control de corriente establecido.

5.1.4. Bloque de comunicación

Para poder ejercer un control del sistema desde el exterior y, que todos los datos que se comunican (desde los diferentes bloques que forman parte del prototipo) puedan ser visualizados por un agente externo al prototipo, es necesario establecer un protocolo de comunicación. Este protocolo, ha de poder ser interpretable por el agente externo que lleve a cabo la lectura de datos y, debe poder distinguir de qué prototipo proceden los mismos.

Esta comunicación se decide realizar mediante un sistema de comunicación en serie síncrona denominado I2C. Se determina el uso de este sistema de comunicación en serie debido a las siguientes ventajas:

- Permite conectar dispositivos en cualquier punto del cable.
- Disminuye el número de pistas a usar en comparación con otros sistemas de comunicación (sistemas de comunicación en paralelo y otros sistemas de comunicación en serie síncrona como el SPI).

El protocolo I2C, es un sistema en el que la comunicación se establece en un ambiente de maestro/esclavo, en el que el maestro es quien inicia la comunicación. Cada dispositivo esclavo dispondrá de una dirección única, que será la que le distinga de los demás dispositivos y, a través de esta dirección distintiva, el dispositivo maestro lo podrá controlar y lanzar las peticiones y órdenes oportunas.

6. SUBSISTEMA HARDWARE

Abordamos ahora la explicación de la toma de decisiones de diseño respecto a los componentes hardware que van a ser empleados en los prototipos. El objetivo es el de cumplir con los requisitos de los bloques mencionados en el capítulo anterior, así como, el diseño del esquemático de nuestro prototipo.

6.1. Componentes

En esta sección, se realiza una descripción detallada de todos y cada uno de los elementos del prototipo; incluyendo su finalidad y la tarea principal que desempeñan.

6.1.1. Calefactor

Teniendo en cuenta los requisitos técnicos relativos al bloque calefactor expuestos con anterioridad y, estudiando previamente las opciones disponibles para su ejecución, se decide diseñar un serpentín que emule ser un ordenador o procesador, capaz de alcanzar como mínimo las temperaturas habituales de uso.

La elección del serpentín se debe a los siguientes motivos:

- La elaboración del serpentín se realiza a partir de una pista de cobre a la que, mediante diseño, le podemos dar la forma y longitud adecuada, así como tener todo el calor concentrado en una misma zona.
- Puede ser fácilmente alimentado de manera independiente al resto de componentes del dispositivo. Se puede hacer uso de una alimentación propia para él mediante los transformadores disponibles.
- Se puede conseguir una variación de temperatura determinada y, ejercer un control de la misma mediante la regulación de la corriente proveniente de la alimentación.

Partiendo de los transformadores de los que se dispone para la alimentación del bloque calefactor, que nos proporcionan un voltaje de 12V y 2A, hemos de realizar el diseño del serpentín de manera que la alimentación resulte suficiente. El serpentín será una pista de cobre que debe soportar 12V y 2A al aire para su funcionamiento. La variación de temperatura se produce mediante la variación de la intensidad de corriente que recorre el mismo.

Antes de proceder al diseño y desarrollo del serpentín como elemento calefactor, ha de entenderse el funcionamiento del mismo. Mediante el uso de la información obtenida

en el documento de la referencia [38], para la determinación del ancho de pista a emplear, se especifican las siguientes premisas:

- Se desea la pista más delgada posible, para minimizar el tamaño del prototipo.
- Los trazos más pequeños y compactos son aquellos que producen una mayor diafonía y menor potencia de manejo.
- El manejo de potencia de la pista depende, principalmente, de dos parámetros: el área de la sección transversal y el aumento de temperatura permisible (típicamente 10°C).

Siguiendo estas premisas, en la figura 6.1, se pueden observar las diferentes rectas de temperatura en función de la corriente eficaz que recorre la pista y el área de sección transversal.

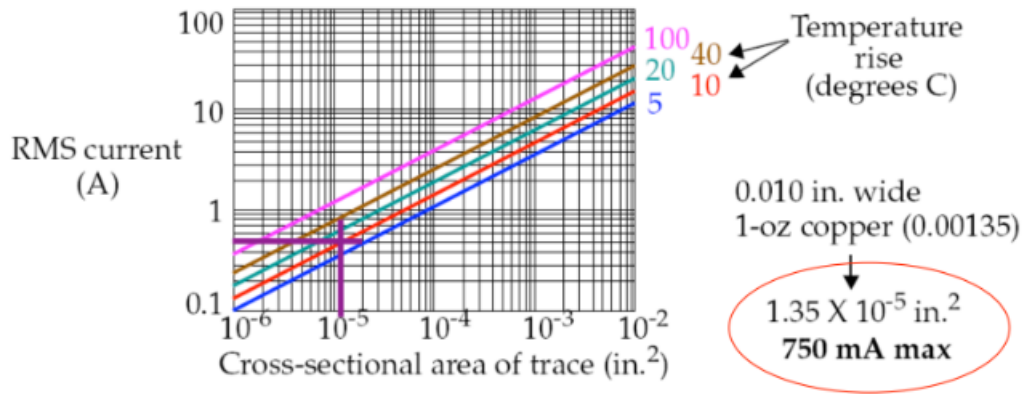


Fig. 6.1. Rectas de aumento de temperatura, Pedro Guerra UPM [38]

Para la determinación de los parámetros de diseño se hará uso, tanto de la ecuación para el cálculo del área transversal (6.1), como de la ecuación de cálculo del ancho de pista (6.2), indicadas en el documento de Pedro Guerra [38], y el uso de la calculadora de pistas digital [39].

$$Area(mils^2) = \frac{I(A)}{\sqrt[k]{k * \Delta T(^{\circ}C)^b}} \quad (6.1)$$

$$Width(mils) = \frac{Area(mils^2)}{Thickness(oz) * 1,378(mils/oz)} \quad (6.2)$$

Las variables k , b y c, que se emplean en la ecuación (6.1), obtienen un valor diferente dependiendo de si la pista a crear es una pista interna o externa. En nuestro caso, se emplean los parámetros mostrados en la figura 6.2, que son los proporcionados por IPC-2221 para la ejecución de pistas externas.

For IPC-2221 internal layers: $k = 0.024$, $b = 0.44$, $c = 0.725$

Fig. 6.2. Valores de las variables k, c, b para pistas externas, Pedro Guerra UPM [38]

Mediante la definición de los parámetros requeridos para el uso de la calculadora mencionada anteriormente, podemos obtener los datos finales para el desarrollo y diseño del serpentín, siendo estos los mostrados en la figura 6.3.

Inputs:

Current	1.8	Amps
Thickness	0.035	mm ▼

Optional Inputs:

Temperature Rise	75	Deg C ▼
Ambient Temperature	25	Deg C ▼
Trace Length	80000	mil ▼

Results for Internal Layers:

Required Trace Width	20.4	mil ▼
Resistance	2.46	Ohms
Voltage Drop	4.44	Volts
Power Loss	7.99	Watts

Results for External Layers in Air:

Required Trace Width	7.83	mil ▼
Resistance	6.41	Ohms
Voltage Drop	11.5	Volts
Power Loss	20.8	Watts

Fig. 6.3. Parámetros definidos para el serpentín mediante el uso de la calculadora digital [39]

A continuación, se procede a justificar la utilización de los parámetros finales:

- Corriente: su valor máximo viene limitado por la alimentación que se emplea en el sistema, siendo éste de aproximadamente de 2A.
- Grosor: el grosor de pista se fija en una onza (aproximadamente $35\mu\text{m}$).

- Incremento de temperatura: se establece este parámetro en 75°C, para alcanzar la temperatura requerida para el estudio y emular un ordenador/procesador.
- Temperatura ambiente: se usa la temperatura ambiente habitual de 25°C.
- Longitud: debemos establecer un valor que proporcione una caída de voltaje que no sea mayor a 12V, que es la alimentación de la que se dispone.

Mediante la definición de los parámetros, previamente explicados, y el uso de la calculadora de pistas, se obtienen:

- Ancho de pista a utilizar durante la fabricación (se redondea a 8 mils).
- Resistencia al paso de corriente que ofrece el serpentín.
- Voltaje de caída.
- Potencia absorbida.

La conjunción de todos los datos obtenidos permite el desarrollo final del serpentín.

6.1.2. Sensor de temperatura LM235Z

Atendiendo a los requisitos del sistema y, los datos de los datasheet consultados para su selección, se decide emplear el sensor de temperatura LM235Z de la marca STMICROELECTRONICS mostrado en la figura 6.4.



Fig. 6.4. Sensor de temperatura LM235Z

El LM235Z es un sensor de temperatura de precisión que puede ser fácilmente calibrado. Opera como un zener de dos terminales y su tensión disruptiva es directamente proporcional a la temperatura absoluta en una relación de 10mV/°K. Su circuito interno tiene una impedancia dinámica menor a 1Ω y es capaz de operar en un rango de corriente comprendido entre 450μA-5mA, sin alterar sus características.

En este proyecto se emplean tres sensores de temperatura, distribuidos en tres puntos específicos del prototipo para la toma de datos:

- En el centro del elemento calefactor, el serpentín.

- Este dispositivo dispone de las características físicas y eléctricas necesarias para la ejecución de las pruebas a realizar. En la figura 6.5, se muestran las rectas de temperatura, en función de la variación de voltaje frente a la corriente inversa.

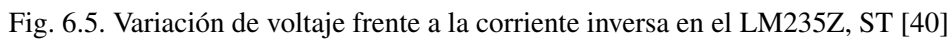


Diagram of the LM235 precision centigrade centimeter. The LM235 is connected to a 5V supply (1) and ground (3). The output (2) is connected to a 10k resistor and ground.

El objetivo de estos sensores es el de la toma de datos de la temperatura a la que se encuentra el líquido refrigerante alrededor de los puntos de interés, anteriormente mencionados. El sensor, proporciona una tensión de salida analógica a través de la patilla número 2 mostrada en la figura 6.6, que se encuentra conectada físicamente a uno de los pines del microcontrolador. El microcontrolador, como se explicará más adelante, es el

encargado de la recepción de estos datos analógicos, así como de su conversión a un tipo de datos interpretable por un agente externo, y de la comunicación de los mismos, a través del protocolo de comunicación establecido. El agente externo, de esta manera, puede monitorizar continuamente la temperatura en todos los puntos de manera simultánea.

Atendiendo a las indicaciones del fabricante y, siguiendo las instrucciones de calibración del dispositivo como un sensor de temperatura básico, se procede al montaje en el prototipo como se muestra en la figura 6.7.

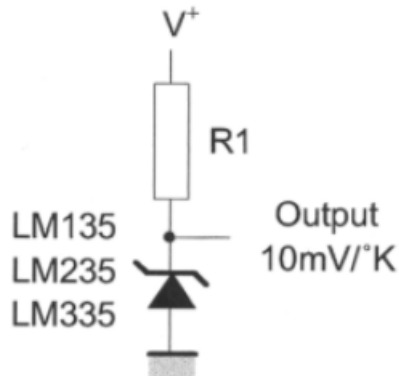


Fig. 6.7. Montaje de sensor de temperatura básico, ST [40]

Para su correcto funcionamiento y, considerando las características de funcionamiento y montaje del sensor LM235Z, se procede a calcular el valor de la resistencia que acompaña al sensor mediante el uso de la ecuación (6.3), que corresponde a la ley de Ohm.

$$V(V) = I(A) * R(\Omega) \quad (6.3)$$

A una temperatura ambiente de 25°C, el sensor proporciona una tensión de salida de 2,98V (V_{OT}). Se utiliza la ecuación (6.4), para calcular el voltaje de salida del sensor a 100°C (siendo $VO_{TO}=75$).

$$\begin{aligned} V(V) &= V_{OT} + VO_{TO} * 0,01 \\ V_{100^{\circ}C} &= 2,98V + 75 * 0,01 = 3,73V \end{aligned} \quad (6.4)$$

Una vez aplicada la fórmula, el voltaje de salida es de 3,73V. Siendo la alimentación de 5V, la tensión que cae en la resistencia ($V(R)$) va a ser de (ecuación 6.5):

$$\begin{aligned} V(R)_{min} &= V_{alimentación} - V_{100^{\circ}C} \\ V(R)_{min} &= 1,27V \\ V(R)_{max} &= V_{alimentación} - V_{25^{\circ}C} \\ V(R)_{max} &= 2,02V \end{aligned} \quad (6.5)$$

Teniendo en cuenta los datos de corriente de polarización, proporcionados en el datasheet por el fabricante, obtenemos los valores de resistencia máxima y mínima que se deben emplear. Siendo los valores de corriente mínima de $I_{min}=450\mu$ A y corriente máxima $I_{max}=5$ mA, empleando la ecuación (6.6), el valor de la resistencia a acompañar a los sensores de temperatura ha de estar entre:

$$\begin{aligned} R_{max} &= \frac{V(R)_{min}}{I_{min}} \\ R_{max} &= 2,82k\Omega \\ R_{min} &= \frac{V(R)_{max}}{I_{max}} \\ R_{min} &= 404\Omega \end{aligned} \tag{6.6}$$

Con los resultados obtenidos, se procede a usar una resistencia de $1k\Omega$ para la correcta calibración y funcionamiento del sensor de temperatura LM235Z.

Estos sensores vienen con un encapsulado tipo DIP, con tres pines y la huella para reservar su espacio en el prototipo a la hora del ensamblado es la TO-92.

6.1.3. Optoacoplador LTV-814-S-TA1, Opto-DIAC MOC3020

Los opto-acopladores son dispositivos de emisión y recepción que funcionan como un interruptor activado mediante luz, la cual es emitida por un diodo LED que satura un componente optoelectrónico.

Para este trabajo, y con la necesidad de cumplir con los requisitos del sistema, se opta por elegir el opto-acoplador LTV814S de la marca Lite-On, mostrado en la figura 6.8, y el Opto-DIAC MOC3020 de la marca Lite-On, mostrado en la figura 6.9.

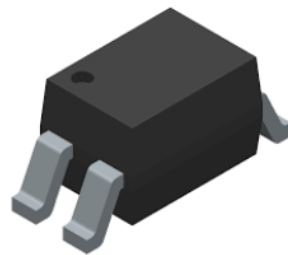


Fig. 6.8. Optoacoplador LTV-814S-TA1

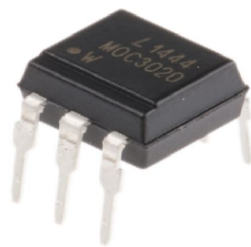


Fig. 6.9. Opto-DIAC MOC3020

El objetivo del uso del opto-acoplador y el opto-DIAC es el de regular, mediante el microcontrolador, el paso de corriente que va a alimentar al serpentín. De esta manera, podemos decidir cuándo interrumpir o permitir el paso de corriente por el circuito, y así obtener diferentes temperaturas en el serpentín, mediante la regulación de la misma, consiguiendo una estabilidad de corriente y evitando picos de subida y de bajada.

El opto-acoplador lleva un encapsulado tipo SMD. La tecnología SMD nos permite montar componentes sobre la superficie de un circuito impreso, sobre las pistas. Una ventaja de esta tecnología es la reducción del tamaño de los componentes.

La conexión de este tipo de dispositivos se realiza mediante fundición de estaño aplicado a las pistas de cobre. Esta tecnología ha reemplazado a otro tipo de encapsulados y tecnologías en aplicaciones de producción en serie.

El opto-DIAC lleva un encapsulado tipo DIP de inserción, en el que las patillas atraviesan la placa de circuito impreso. Los pines se distribuyen en dos hileras paralelas y una muesca en la carcasa plástica nos indica la posición del primer pin.

Ambos dispositivos llevan una huella asociada, para reservar su espacio en la placa base a la hora de ensamblar los componentes.

El funcionamiento de estos dispositivos en nuestro trabajo está estrechamente relacionado con otro componente, el triac, con lo que la explicación de su disposición en el prototipo y su conexión, así como las resistencias relacionadas con su montaje serán desarrolladas posteriormente.

6.1.4. Triac BT136X-600E

Este dispositivo, de tres terminales, se emplea para controlar el flujo de corriente a una carga y permite el paso de corriente en ambos sentidos. Puede ser bloqueado mediante la disminución de corriente o por inversión de tensión.

Los dispositivos triac pueden ser disparados indistintamente de la polarización de la puerta, dicho de otro modo, pueden ser disparados mediante el uso tanto de una corriente de puerta positiva como negativa.

Cumpliendo con los requisitos del estudio, se opta por el uso del triac BT136X-600E de la marca WeEn Semiconductors Company mostrado en la figura 6.10.



Fig. 6.10. Triac BT136X-600E

El uso del triac permite una conmutación bidireccional y control de fase. Pertenece a la serie E de la compañía y, permite la conexión directa a microcontroladores, circuitos integrados lógicos y otros circuitos de disparo de puerta de baja potencia.

Como se especificó previamente, el uso y funcionamiento de este dispositivo está estrechamente relacionado con los opto-acopladores. Para su correcta disposición y funcionamiento en el trabajo que se presenta, se opta por seguir el mismo esquema que el fabricante NXP. En concreto se toma como ejemplo el de la atenuación de una lámpara con el uso de un microcontrolador, que puede ser empleado para la realización de nuestro proyecto mediante una serie de modificaciones [41].

Para aplicar con éxito un triac y establecer un control de potencia, es necesaria una comprensión de las características del triac y sus limitaciones. Los triacs activan la conducción cuando se aplica una señal de baja energía a su puerta, permitiendo un control completo de la onda de corriente alterna recibida.

En la figura 6.11 se muestra la interconexión de los terminales del triac. Los terminales MT1 y MT2 son los terminales portadores de corriente, y G es el terminal de puerta que se utiliza para activar el dispositivo.

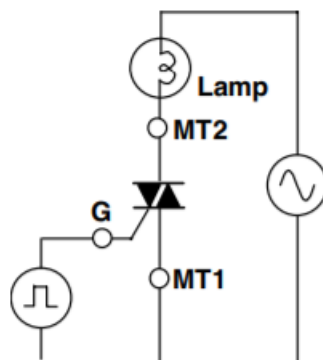


Fig. 6.11. Terminales del triac BT136X-600E, NXP [41]

Para poder efectuar un disparo del triac se requiere cumplir con la especificación de energía de la puerta, para asegurar el encendido completo de la compuerta (ayudando a prevenir un falso disparo). La corriente de puerta, aplicada mediante un tren de impulsos (señal PWM), debe ser de al menos tres veces la corriente de encendido de la misma.

También es importante mantener, hasta el pulso de activación de entrada, el sincronismo con la línea de alimentación de corriente alterna, para tener una conducción constante.

El período durante el cual el dispositivo está encendido se llama ángulo de conducción (α). Variando α se controlará la porción de la onda sinusoidal aplicada a la carga y, por lo tanto, permite regular el flujo de potencia aplicado a la carga. En la figura 6.12 se muestra el principio de control de la potencia del triac.

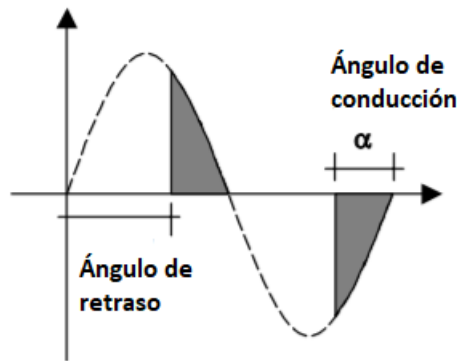


Fig. 6.12. Principio de control de la potencia del triac, NXP [41]

Una vez entendido el uso de los opto-acopladores y el triac, y sus posibles aplicaciones, se procede a su diseño esquemático siguiendo el ejemplo anteriormente mencionado. Se han de realizar una serie de modificaciones para adaptar el esquema ejemplo a nuestro trabajo como, por ejemplo, la sustitución de la lámpara por el serpentín, el cual será nuestra carga.

Siguiendo las recomendaciones del fabricante NXP [41], se procede al montaje y diseño de nuestros dispositivos como se muestra en la figura 6.13.

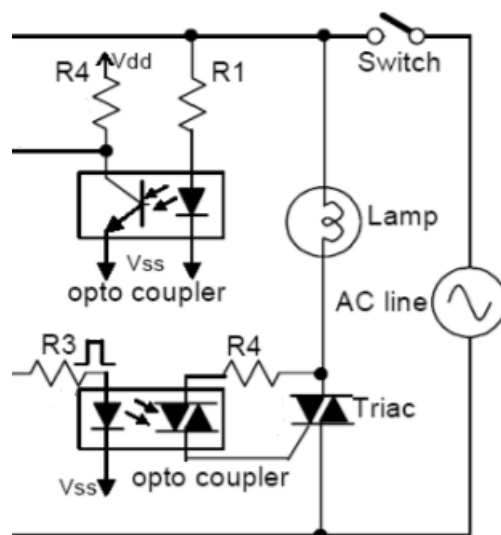


Fig. 6.13. Montaje de Opto-acopladores y triac para el control del serpentín, NXP [41]

Para su correcto funcionamiento y uso, cumpliendo con los requisitos, se calcula el valor de las resistencias que deben acompañar a los componentes en el circuito, resultando ser las mostradas a continuación:

- Resistencia Diodo-optoacoplador: 680Ω
- Resistencia Transistor-opto: $1k\Omega$
- Resistencia Diodo-optodiad: 220Ω
- Resistencia Diac-optodiad: 470Ω

6.1.5. Microcontrolador PIC16F18426

El microcontrolador es el encargado de llevar a cabo o ejecutar los programas implementados. Se trata de un chip que contiene en su interior circuitos integrados, transistores, protegidos por una cobertura (generalmente de cerámica o plástico). La función de un microcontrolador consiste en recuperar, interpretar, cumplir instrucciones y operar con los datos que recibe.

Estos dispositivos funcionan debido a que llevan en su interior un software previamente programado y cargado en el dispositivo. La velocidad de estos dispositivos se mide en megahercios (MHz) o gigahercios (GHz).

Se componen de registros (memorias de poca capacidad y velocidad alta para guardar valores matemáticos en forma transitoria), de una unidad de control (realiza el control de las ejecuciones de las instrucciones que ingresan en el microcontrolador) y de una unidad aritmético-lógica (que ejecuta las operaciones aritméticas y lógicas).

Para la ejecución de este estudio se decide usar el microcontrolador PIC16F18426 del fabricante Microchip.

La elección de este dispositivo se debe a que cumple con los requisitos del sistema de forma suficiente sin aumentar el coste de una manera notable.

Este microcontrolador, dispone de catorce pines distribuidos en dos hileras paralelas de siete, como se muestra en la figura 6.14. La elección de este número de pines concreto, se debe, a que es un número que resulta suficiente para la conexión de todos los dispositivos que deben establecer comunicación con él, así como los pines destinados a la programación del dispositivo, los necesarios para establecer su alimentación y los destinados para la salida de datos al exterior.

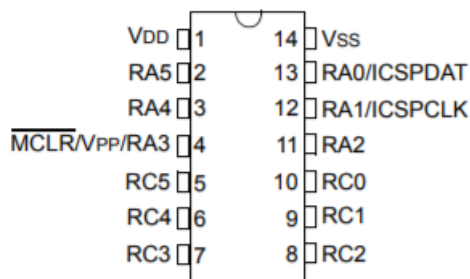


Fig. 6.14. Distribución de pines del microcontrolador PIC16F18426, Microchip [42]

A su vez, el PIC16F18426 cuenta con cinco módulos de conversión analógico-digital (ADC/DAC), siendo realmente utilizados tres de ellos por los sensores de temperatura LM235Z. Dispone de 12 bits de precisión, suficientes para poder almacenar los datos analógicos que provienen de los sensores. Una vez adquiridos los datos, el microcontrolador es capaz de convertir dichos datos analógicos a digitales, que son datos que pueden ser leídos por el usuario exterior a través de un elemento como puede ser, por ejemplo, un ordenador.

Este módulo incorpora un tiempo de adquisición programable, lo que nos permite seleccionar un canal e iniciar una conversión sin tener que esperar un tiempo de muestreo, por lo tanto, se reduce la sobrecarga de código a la hora de su desarrollo. También cuenta con características de cálculo, proporciona un filtro digital e incorpora rutinas de interrupción.

Los módulos ADC de los que dispone el microcontrolador, permiten la conversión de una señal analógica de entrada a una representación binaria de 12 bits. Este dispositivo usa entradas analógicas, que se multiplexan en una sola muestra. La salida de los datos y la retención se conectan a la entrada del convertidor. El convertidor, genera un resultado binario de 12 bits mediante una aproximación sucesiva y almacena el resultado de la conversión en los registros de resultados de los que dispone el ADC: ADRESH y ADRESL.

La conversión ADC se desencadena a petición del dispositivo maestro.

En la figura 6.15, se muestra el diagrama de bloques relativo al funcionamiento del módulo ADC.

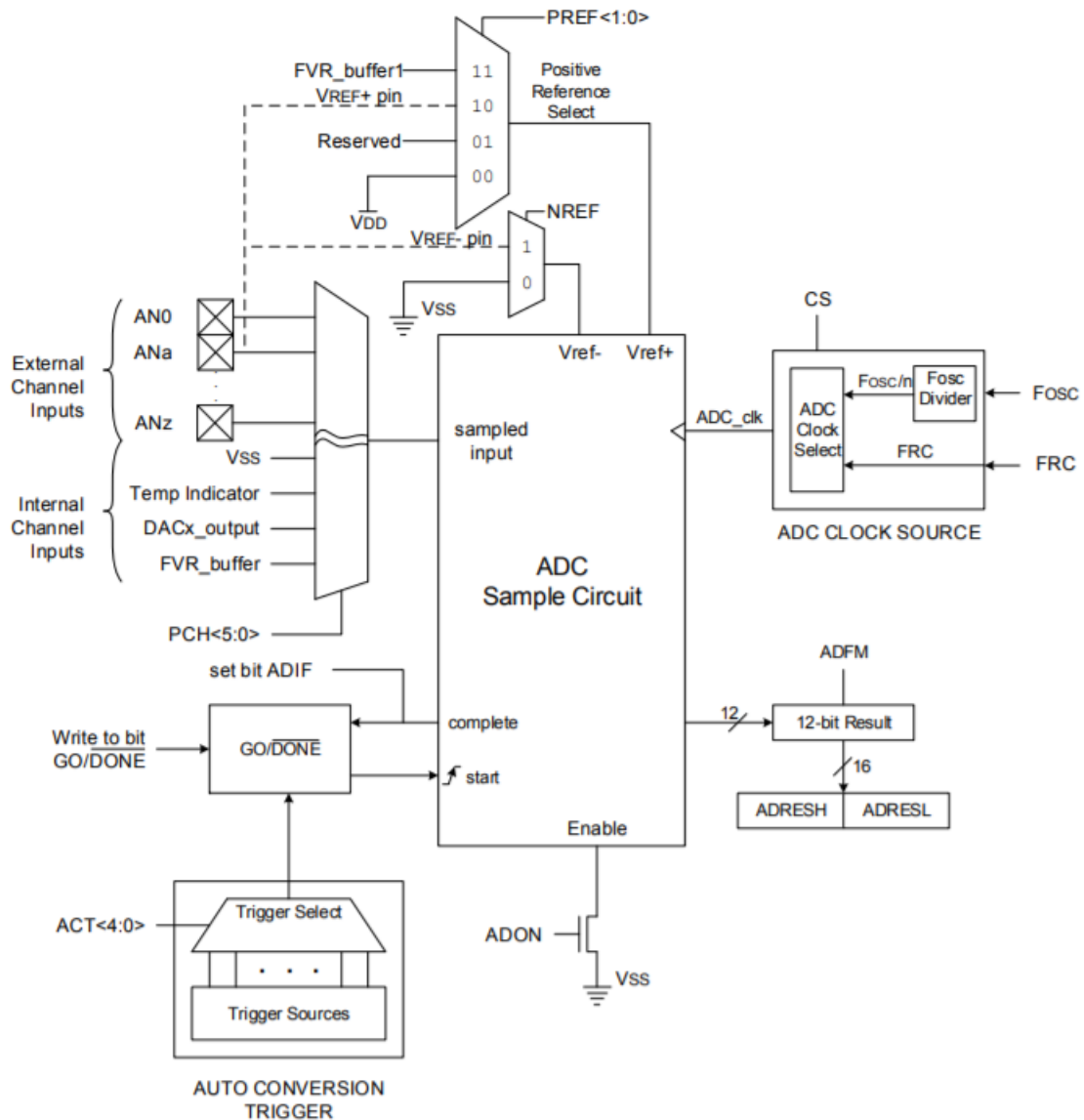


Fig. 6.15. Diagrama de bloques del módulo ADC, Microchip [42]

El microcontrolador 16F18426 dispone, además, del módulo MSSP (Master Synchronous Serial Port Module). Este módulo es una interfaz de comunicación en serie, útil para la comunicación con otros dispositivos o periféricos, como microcontroladores. Este módulo MSSP que incluye el microcontrolador seleccionado, puede ser operado en dos modos: SPI (Serial Peripheral Interface) e I2C (Inter-Integrated Circuit).

El modo de empleo de este módulo seleccionado para el trabajo es el I2C, que se interpuso como requisito en un capítulo anterior. El I2C es un bus de circuito integrado

de comunicación en serie de datos multimaestro. Los dispositivos pueden comunicarse en ambiente esclavo/maestro, en el cual el dispositivo maestro inicia la comunicación y el dispositivo esclavo es controlado a través de una dirección previamente asignada.

A continuación, se muestran los diagramas de bloques del módulo MSSP relativos al modo maestro de comunicación I2C (figura 6.16) y al modo esclavo de comunicación I2C (figura 6.17).

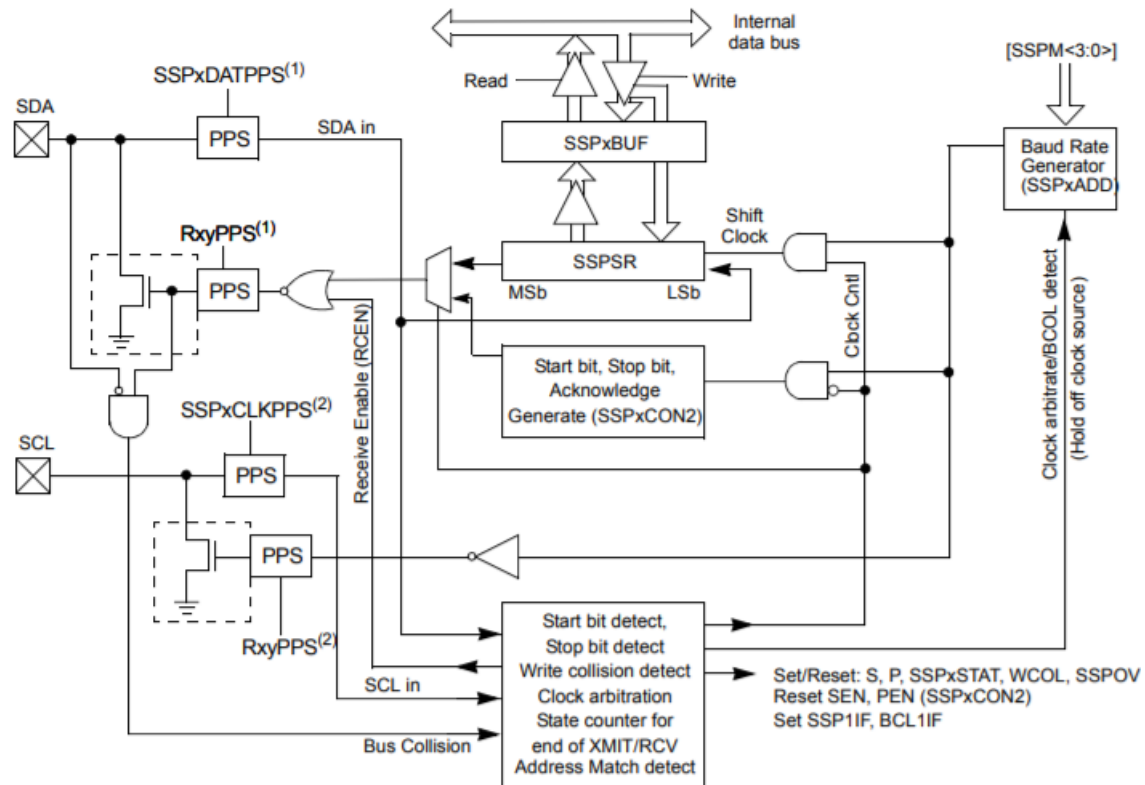


Fig. 6.16. Diagrama de bloques del módulo MSSP I2C Maestro, Microchip [42]

El dispositivo Raspberry PI, empleado como maestro en nuestro sistema, lleva incorporadas resistencias de extracción para establecer la conexión. Por tanto, no es necesario añadir dichas resistencias al esquemático del prototipo.

El bus I2C puede funcionar con uno o más dispositivos maestros y con un único dispositivo esclavo o varios.

Este microcontrolador, dispone también de un módulo CCP (Capture-Compare-PWM), que permite al usuario controlar el tiempo y los diferentes eventos que suceden, además de generar señales de modulación PWM. Para la realización de las labores de control global que ejecuta el microcontrolador, en el prototipo, se emplea el modo de comparación. Este modo permite al usuario activar un evento externo cuando transcurre una cantidad de tiempo predeterminada.

El modo de comparación, descrito a continuación, está disponible para todos los módulos de CCP y hace uso de los recursos del temporizador de 16 bits. Cuando el valor de 16 bits del registro del timer coincide con los valores de registro del CCPRx, se activa la señal de salida, que permanece activa hasta que el timer llega su valor de fin de cuenta. La diferencia entre el valor de fin del timer y el valor del CCP nos fija el ancho del pulso. En la figura 6.19 se muestra el diagrama de bloques que se corresponde al funcionamiento del modo de comparación del módulo CCP. Todos los modos de comparación pueden generar una interrupción.

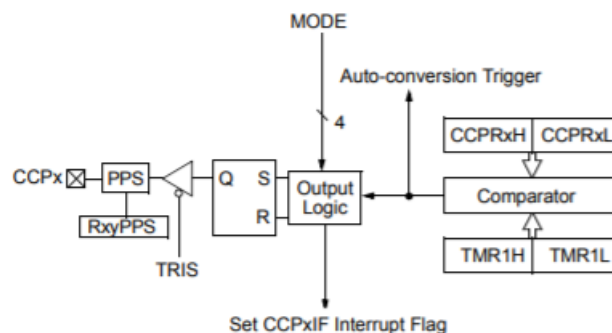


Fig. 6.19. Diagrama de bloques módulo CCP en modo de comparación, Microchip [42]

Para las labores de control global y control de corriente, este microcontrolador dispone de un módulo de detección de pasos por cero, denominado modulo ZCD (Zero Cross Detection).

El módulo ZCD detecta cuándo una señal de corriente alterna atraviesa el potencial de tierra. El umbral de cruce cero real, es el voltaje de referencia de cruce por cero, Z_{cpin} , que es típicamente 0,75V sobre el nivel de tierra.

La conexión a la señal de corriente alterna a detectar, se realiza a través de una resistencia en serie, cuya función es la de limitar el paso de corriente. El módulo, aplica una fuente de corriente o sumidero al pin ZCD para mantener un voltaje constante en el pin,

evitando así que el voltaje de pin influya en los diodos de protección de ESD.

Cuando la tensión aplicada es mayor que la tensión de referencia, el módulo disminuye la corriente. Cuando el voltaje aplicado es menor que el voltaje de referencia, el módulo recibe corriente. Las acciones de fuente y sumidero mantienen constante el voltaje del pin. El diagrama de bloques del módulo ZCD se muestra en la siguiente figura 6.20

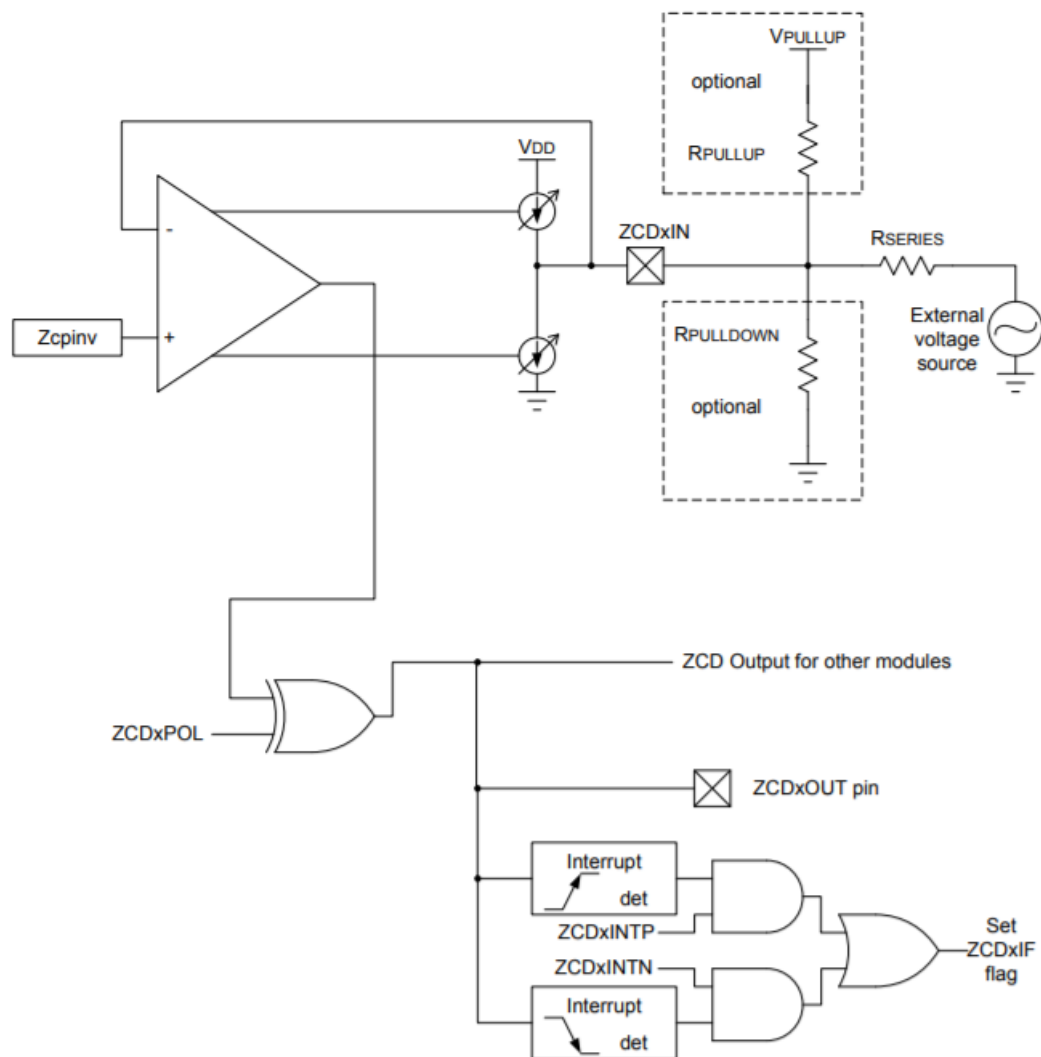


Fig. 6.20. Diagrama de bloques del módulo ZCD, Microchip [42]

Siguiendo las indicaciones del fabricante a través del datasheet proporcionado, el microcontrolador de 8 bits necesita una serie de conexiones de pin mínimas, mostradas en la figura 6.21, señalando que los siguientes pines siempre deben de estar conectados:

- Pines de alimentación VDD y VSS
- Pin maestro MCLR

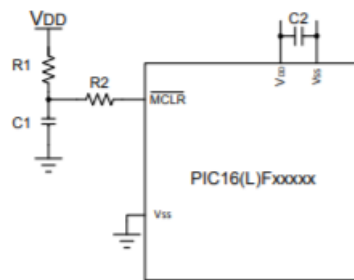


Fig. 6.21. Conexiones mínimas recomendadas para el PIC16F18426, Microchip [42]

El pin MCLR tiene dos funciones específicas del dispositivo: reinicio del dispositivo y programación y depuración del dispositivo.

Durante el proceso de programación y depuración del dispositivo, se debe colocar una resistencia y una capacitancia (condensador) al pin MCLR, como se muestra en la figura 6.22. El condensador C1 se aísla del pin MCLR durante las operaciones de programación y doblaje mediante un puente. El puente se reemplaza para las operaciones normales de ejecución.

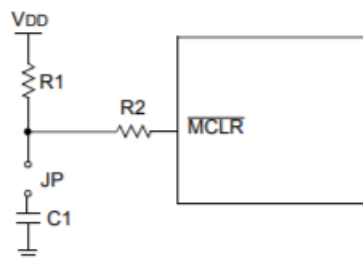


Fig. 6.22. Conexiones requeridas para el pin MCLR, Microchip [42]

El microcontrolador PIC16F18426 tiene una huella asociada. Esta huella se empleará para reservar el espacio necesario en el prototipo a la hora del ensamblado.

6.1.6. Conectores

Estos componentes se emplean para la interconexión de dispositivos, así como para la alimentación, salida de datos y entradas para aparatos de programación de software, como pueden ser los PICkit de la marca microchip.

En este proyecto han sido empleados en total cinco conectores: un conector de cinco pines, dos conectores de cuatro pines y dos conectores de dos pines.

El conector de cinco pines está destinado a la programación del microcontrolador con el software deseado. La programación del dispositivo se efectuará mediante un dispositivo PICkit 3, cuya configuración de pines es la mostrada en la figura 6.23, que ha de ser seguida para su correcta conexión con el microcontrolador.

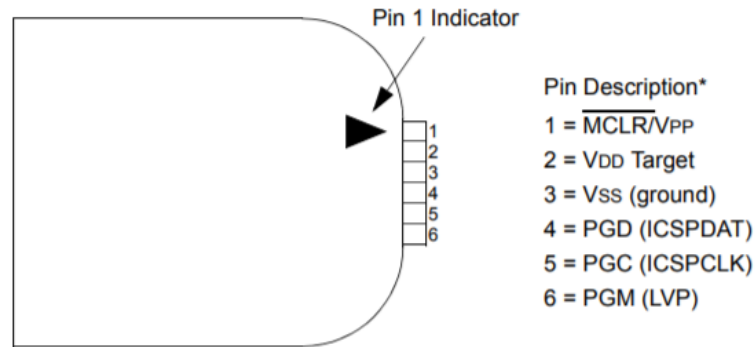


Fig. 6.23. PICkit 3 pinout, Microchip [43]

Los dos conectores de cuatro pines están destinados a la alimentación del microcontrolador (VDD y GND), la señal de entrada de reloj y para la comunicación de datos con el exterior. Estos conectores están interconectados entre sí, de este modo, se facilita la alimentación de sucesivas placas sin tener que hacer uso de cables externos adicionales.

Uno de los conectores de dos pines está destinado a la entrada de corriente proveniente del generador y que alimentará el serpentín; el otro conector de dos pines se encuentra reservado contemplando la posibilidad de añadir aplicaciones y mejoras en un futuro.

6.2. Diseño esquemático y PCB

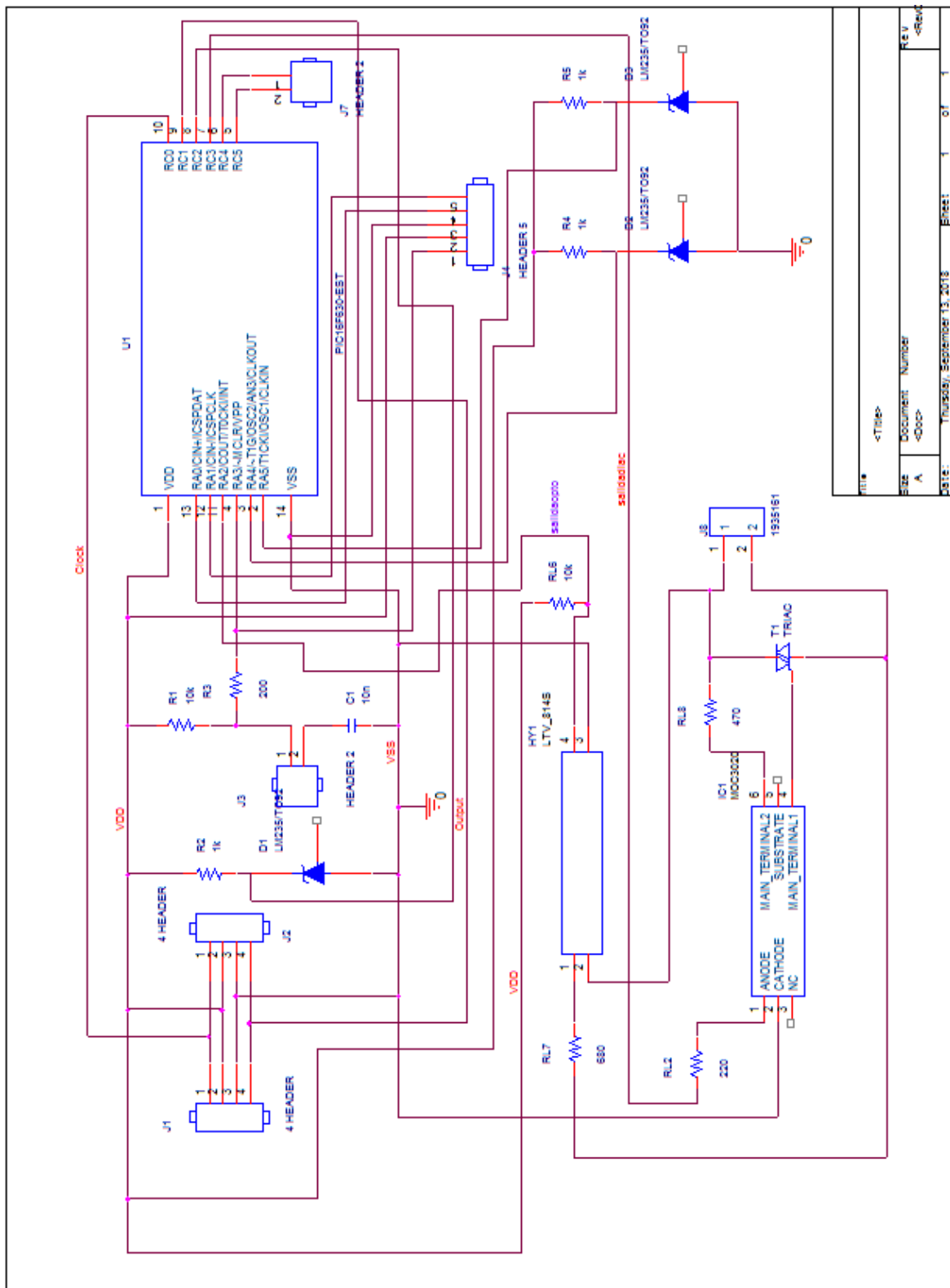
Una PCB es una placa de circuito impreso, compuesta por distintos componentes de montaje superficial y la unión de los dispositivos o buses mediante un material semiconductor, generalmente cobre.

Para el diseño del prototipo (PCB), se ha hecho uso del software “Orcad Capture Cis”. Este programa permite crear archivos de fabricación comprensibles, para la posterior impresión de las placas, permitiendo fabricar los prototipos. Posteriormente, se soldarán los distintos componentes que formarán parte de dicha placa.

Para la elaboración del diseño esquemático del sistema, han sido elegidos los componentes que contendrá, y se asociarán las huellas de los dispositivos correspondientes.

Se realizará el enrutamiento de todos los componentes incluidos, y se configurará la disposición de los mismos en el espacio físico requerido.

Una vez realizado todo este proceso, se muestra en la figura 6.24 el esquemático terminado del proyecto.



Una vez creado el esquemático, se procederá a generar la NetList. La NetList es una lista donde se especifican las conexiones entre los componentes del esquemático.

Una vez la NetList ha sido generada como un archivo .mnl, se hace uso de este archivo para generar una visión espacial del prototipo, mediante el uso del PCB Editor Design Proffesional; es decir, se muestran todas las huellas de los componentes y las conexiones a realizar entre ellos. Mediante el modo manual del entorno de desarrollo, se procede al emplazamiento de los componentes dentro de una línea que nos delimita el espacio físico del prototipo.

Como se puede observar en la siguiente figura 6.25, en la disposición final de la placa se observan dos colores. Cada uno de ellos corresponde a la cara en la que están emplazadas físicamente las pistas, pudiendo estar éstas situadas en la cara bottom o top de la placa base.

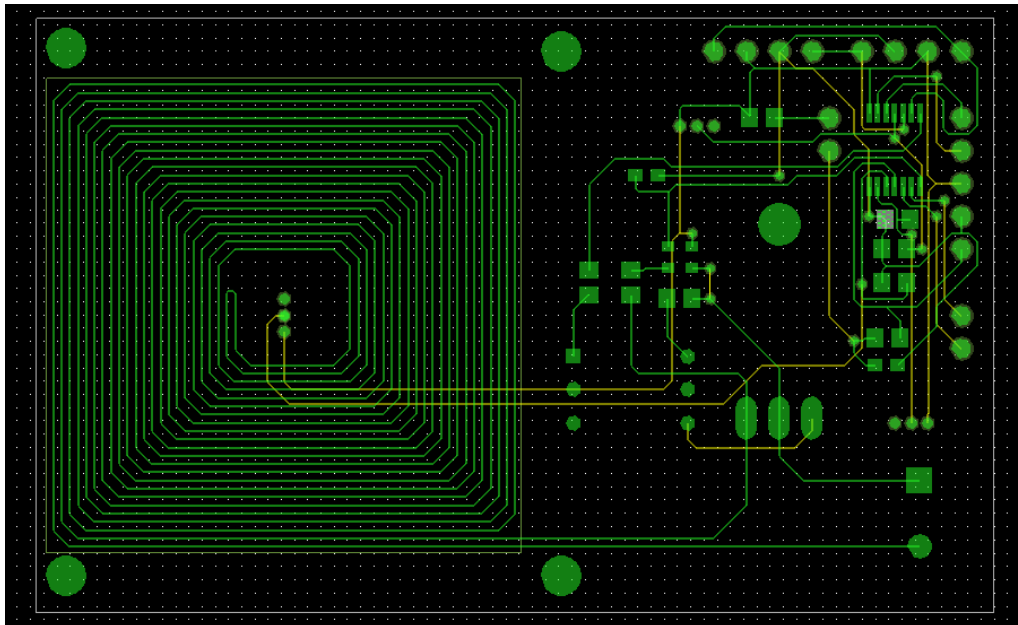


Fig. 6.25. Visualización de las pistas situadas en la capa bot y top del prototipo

Una vez se ha terminado el diseño digital de la placa, se coge el archivo .bdr y se generan los gerber necesarios para mandar a construir el prototipo físico; quedando la placa, sin el ensamblaje manual de los componentes, como se muestra en la siguiente figura 6.26.

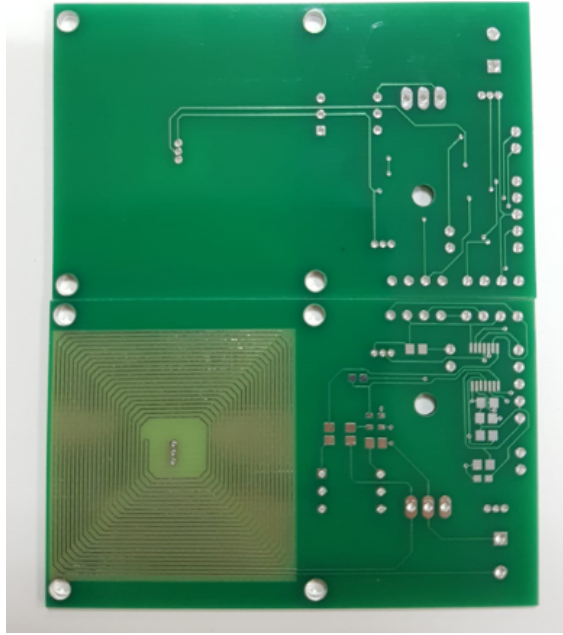


Fig. 6.26. Vista posterior y anterior del dispositivo fabricado, sin el emplazamiento de los componentes

Una vez comprobado que los prototipos han sido generados correctamente, y no disponen de ningún defecto de creación, fabricación o no cumplen con los requisitos (como, por ejemplo, evitar tener en pistas con cambios de dirección en ángulo recto), se procede al ensamblaje manual de los componentes mediante el uso del soldador de estaño.

Finalizado el proceso de ensamblaje y, retirado los posibles excesos de estaño de la soldadura, el resultado final de la placa es el presentado en la siguiente figura 6.27.

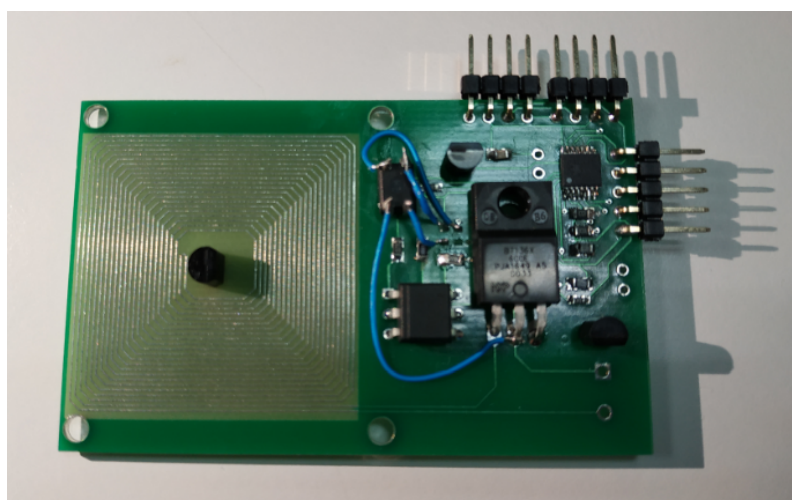


Fig. 6.27. Prototipo final, montado y ensamblado

7. SUBSISTEMA SOFTWARE

7.1. Visión global del sistema

A continuación, en la figura 7.1, se muestra el diagrama de flujo por el que se rige el funcionamiento del software desarrollado para el estudio.

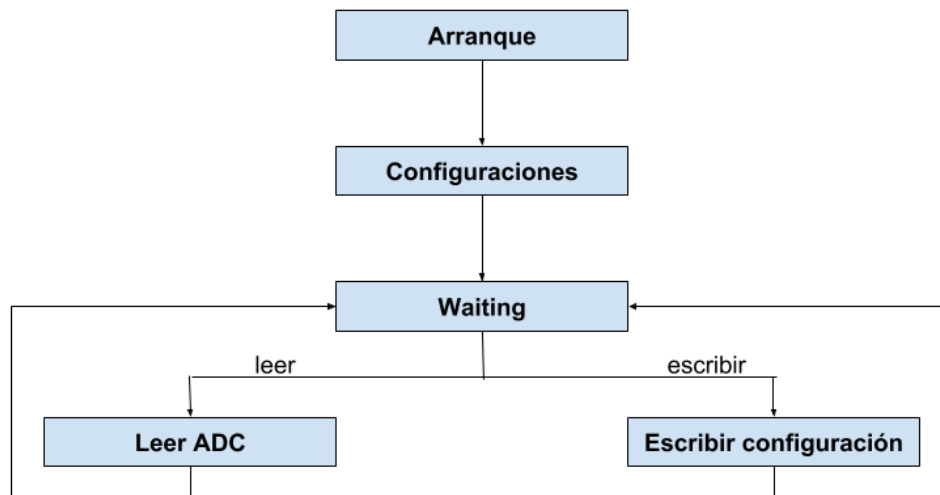


Fig. 7.1. Diagrama de flujo del software desarrollado

Este software se ejecuta de manera continua durante el estudio, por lo que el sistema nunca para de tomar datos hasta su desconexión. El funcionamiento del software es el siguiente:

- Al comienzo, se procede al arranque del sistema.
- Una vez el software se está ejecutando se avanza al estado configuraciones.
- En el estado configuraciones se llama a las funciones para inicializar todos los valores de los registros pertinentes y, habilitar los módulos del microcontrolador que se requieran en el estudio.
- Avanzamos al estado waiting, donde el sistema se encuentra a la espera de órdenes. Mientras tanto, regula el paso de corriente de acuerdo a los parámetros de configuración. Cuando recibe una orden, dependiendo del tipo que sea, avanza a un estado o a otro.
- En el estado leer ADC, el sistema se encuentra a la espera de una orden del I2C de leer los datos provenientes de los sensores de temperatura habilitados para ello. Cuando finaliza el proceso, vuelve al estado waiting.

- En el estado escribir configuración se ejecutan los cambios del tiempo de paso para el triac y el ancho de pulso necesarios. Una vez ejecutados los cambios se avanza al estado waiting a la espera de ordenes.

7.1.1. ADC

El objetivo de la inclusión del ADC, es la transformación de señales eléctricas analógicas en números digitales equivalentes [44]. Para no perder información en el proceso de transformación de la señal, los pasos a realizar han de ser ejecutados de forma óptima. Cuanto mayor sea la cantidad de bits del módulo ADC del microcontrolador utilizado, mayor será la precisión. El módulo ADC del microcontrolador empleado en este estudio tiene una precisión de 12 bits. Por tanto, en nuestro sistema alimentado a 5V, podremos realizar medidas de hasta $5/(2^{12})=1\text{mV}$.

En nuestro caso, las señales analógicas que se toman para su transformación digital son las temperaturas captadas por los sensores dedicados a esa función situados en el prototipo. En la figura 7.2, se muestra el proceso que sigue la señal analógica captada por los sensores de temperatura del prototipo hasta su conversión digital.

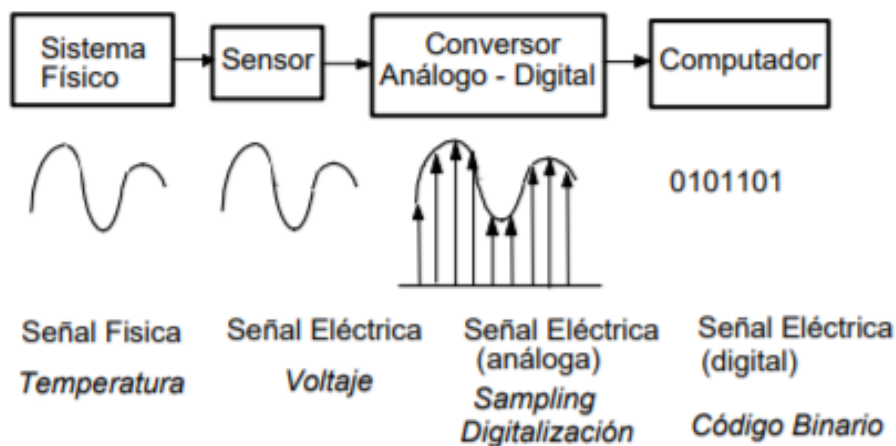


Fig. 7.2. Conversión analógico-digital de la temperatura, Juan Ignacio Huircán [44]

El microcontrolador PIC16F18426, tiene a disposición cinco módulos de conversión ADC, de los cuales emplearemos tres de ellos, para muestrear las tres señales provenientes de los sensores de temperatura situados en el prototipo. A la hora de seleccionar los pines del microcontrolador a utilizar en el modo de conversión ADC, se ha de tener en cuenta que el pin elegido no supone inhabilitar el mismo para el uso de otros módulos necesarios para el estudio. De esta manera, se seleccionan los pines RA4, RA5 y RC2, como los pines de conexión para los sensores de temperatura LM235Z.

Para que el microcontrolador entienda que estos pines seleccionados se deben comportar como pines del módulo de conversión analógico-digital, se han de configurar de la manera correcta y apropiada para su uso (el mismo pin con distinta configuración puede

tener una utilidad completamente diferente). En la figura 7.3, se muestra la configuración empleada para el módulo del ADC.

```
void ADC_config() {
    CLKRCONbits.CLKREN = 0;
    ADC_OFF(); // Apagar ADC antes de la configuracion
    ADCON0bits.FM = 1;
    ADCON0bits.CS = 0; // reloj soportado por el FOSC
    ADPCH = 0b000100;
    ADCLK = 0b0000000;
    ADREFbits.PREF = 0; //reference voltage
    ADREFbits.NREF = 0;
    TRISAbits.TRISA4 = 1; //RA4 como entrada
    TRISAbits.TRISA5 = 1; //RA5 como entrada
    TRISCbits.TRISC2 = 1; //RC2 como entrada
    ANSELAbits.ANSA4 = 1; //RA4 como analogico
    ANSELAbits.ANSA5 = 1; //RA5 como analogico
    ANSELCbits.ANSC2 = 1; //RC2 como analogica
    ADCON0bits.ON = 1; // Para activar el ADC
}
```

Fig. 7.3. Configuración del módulo ADC

- El bit CLKREN correspondiente al módulo CLKRCON, se establece en 0 para deshabilitar el uso del reloj de referencia.
- Se ha de deshabilitar el módulo ADC para proceder a su configuración.
- Del módulo ADCON0 se establece el bit FM a 1, para justificar a la derecha los datos convertidos.
- Del módulo ADCON0 se establece el bit CS a 0, para que utilice el reloj interno del oscilador.
- Los bits del módulo TRISA, TRISA4 y TRISA5, también el TRISC2, del módulo TRISC, se establecen a 1, para definirlos como entradas.
- Los bits del módulo ANSELA, ANSA4 y ANSA5, así como el ANSC2, del módulo ANSELC, se establecen a 1, para configurarlos como analógicos.
- Se pone el bit ON del módulo ADCON0 a 1 para habilitar el ADC.
- ADPCH, selecciona el pin de entrada al ADC para ser muestreado.

Para poder tomar los datos y realizar la conversión, se ha de mandar un comando que pida la información desde el microcontrolador maestro. Esta lectura de datos se hace a través de la función leer_ADC, que se muestra a continuación en la figura 7.4.

```

void leer_ADC(unsigned char pin) {
    ADPCH_SELECT_CHANNEL(adc_channel[pin]);
    ADCON0bits.GO = 1; //Empieza la conversión
    while (ADCON0bits.GO);
    adc[2*pin] = ADRESL;
    adc[2*pin+1] = ADRESH;
}

```

Fig. 7.4. Función leer para la toma de datos de los pines ADC

- Se selecciona el canal mediante `ADPCH_SELECT_CHANNEL(adc_channel[pin])`. Dependiendo del valor del parámetro que reciba, se leerá de uno u otro canal previamente definidos.
- Una vez seleccionado el pin a leer, se activa el bit GO del módulo `ADCCON0`, para empezar con la conversión analógico-digital.
- Se establece un `while` para que los datos se tomen cuando finalice el proceso de conversión. Los datos correspondientes a la señal digitalizada (`ADRESL` y `ADRESH`) se guardan en un array.

7.1.2. Paso por cero y control del triac

Como se procedió a explicar en el capítulo anterior, para ejercer las labores de control global y control de corriente, se dispone de un módulo de detección de pasos por cero, denominado módulo ZCD (Zero Cross Detection). Este módulo tiene la función de detectar cuándo una señal de corriente alterna de alimentación atraviesa el potencial de tierra.

La conexión a la señal de corriente alterna a detectar, se realiza a través de los elementos optoelectrónicos a una resistencia en serie, cuya función es la de regular el paso de corriente. Cuando se detecta un paso por cero, se genera una interrupción que habilita el timer que controla el CCP. De este modo, se consigue controlar el ángulo de conducción de triac, y así controlar la porción de onda sinusoidal que se aplica a la carga.

Para la selección del pin destinado a la detección del paso por cero, se siguen las indicaciones dadas por el fabricante en el datasheet, siendo este el pin RA2. Este pin a su vez va conectado al optoacoplador que a su vez recibe la señal del transformador, para, finalmente, permitir la labor de control del paso de corriente.

Como la detección del paso por cero genera una interrupción es necesario habilitar las interrupciones del módulo del paso por cero y limpiar su flag.

Para establecer la labor de control de corriente, el uso de este módulo se complementa con el módulo CCP, también comentado en el capítulo previo. Antes de proceder a la explicación del funcionamiento de ambos módulos en conjunto y la labor que hacen,

se muestran en las figuras 7.5, 7.6 y 7.7 las configuraciones iniciales necesarias de los módulos ZCD , CCP y del timer1.

```
void zcd_config() {  
    ZCDCONbits.ZCDINTP = 1;  
    ZCDCONbits.ZCDINTN = 1;  
    ZCDCONbits.ZCDPOL = 0; // no invertimos  
}
```

Fig. 7.5. Configuración del módulo ZCD

- Se establece el bit ZCDINTP del módulo ZCDCON a 1, para establecer la detección en flanco de subida.
- Configurar el bit ZCDINTN del módulo ZCDCON a 1, para determinar la detección en flanco de bajada.
- Establecer el bit ZCDPOL del módulo ZCDCON a 0, para no invertir la polarización.

```
void ccp_config() {  
    CCP1CONbits.EN = 1;  
    CCP1CONbits.MODE = 0b1000;  
    TRISCbits.TRISC3 = 0; //Configurado como salida  
    RC3PPS = 0x09; //el valor de la direccion  
    //de salida del CCP1OUT  
    CCPTMRS0bits.C1TSEL = 0b01;  
    CCP1H = config[1];  
    CCP1L = config[0];  
    CCP1CONbits.EN=1;  
}
```

Fig. 7.6. Configuración del módulo CCP

- Configurar el bit EN del módulo CCP1CON a 1, para habilitar el uso del módulo CCP.
- Se establecen los bits MODE del módulo CCP1CON a 0b1000, que corresponden al modo de comparación que se quiere emplear.
- Configurar el pin TRISC3 a 0 para ponerlo como salida.
- Se interconecta el pin RC3 con el módulo MSSP, indicando en RC3PPS el valor correspondiente. Este pin será la salida del módulo CCP y, mandará la señal que va a excitar al triac.

- Mediante los bits del C1TSEL del CCPTMRS0 seleccionamos el uso del Timer 1 para el módulo CCP en modo comparación, tal y como recomienda el fabricante en el datasheet.
- Determinar los valores de cuenta de los registros del módulo de comparación CCPR1H y CCPR1L.

```
void timer_config() {
    TMR1CLKbits.CS = 0b000001;
    T1CONbits.CKPS = 0b00;
    T1CONbits.RD16 = 1;
    T1CONbits.NOT_SYNC = 1;
    T1GCONbits.GE = 0;
    T1GCONbits.GPOL = 0;
    PR1 = CCPR1 + config[2];
    TMR1H = 0x00;
    TMR1L = 0x00;
    T1CONbits.ON = 0;
}
```

Fig. 7.7. Configuración del módulo Timer1

- Apagar el timer 1 para poder configurarlo con seguridad, indicando un 0 en el bit ON del módulo TMR1CON.
- Configurar el bit GE del módulo T1CON a 1 para habilitar la puerta del timer.
- Se configura el valor máximo de cuenta del timer PR1, para delimitar el ancho del pulso que extitirá el triac.
- Poner los valores iniciales de los registros TMR1H y TMR1L.
- Indicar los valores mostrados de los bits CKPS , RD16, NOT_SYNC, y GPOL de los módulos T1CON y T1GCON para fijar el preescalado, habilitar la lectura y escritura, no sincronizarse con el reloj externo y no invertir la polarización.
- Indicar, mediante los bits del registro CS (del módulo TMR1CLK) la fuente de la señal de reloj.

Una vez establecidas las configuraciones iniciales de los módulos que van a actuar en conjunto (para establecer un control de la corriente que circula por el serpentín), se puede proceder a explicar el funcionamiento de los mismos:

- Se configuran todos los módulos e interrupciones que toman parte del proceso de control.

- A través del módulo ZCD, se detectan los pasos por cero de la señal de alimentación de corriente alterna.
- El módulo ZCD lanza una interrupción, mediante la activación de su flag, y se activa el timer1.
- Cuando los valores de los registros del timer1 y del módulo CCP en modo comparación coinciden, se activa la señal de salida en RC3. Cuando el timer1 llega al final de su cuenta, RC3 se pone a 0. En resumen, en RC3 se genera un pulso que se envía al triac, controlando la señal de excitación del mismo y permitiendo el paso de corriente y su regulación.

Como se puede ver, es necesario habilitar las interrupciones de todos los módulos, para el correcto funcionamiento del sistema planteado. La configuración de estas interrupciones se muestra en la figura 7.8. En este caso las explicaciones necesarias de la configuración se pueden observar en la misma figura.

```
void interrupt_config() {
    PIR2bits.ZCDIF=0; // Limpiamos el flag
    PIE2bits.ZCDIE=1; // para activar las interrupciones del paso por cero
    PIR4bits.TMR1IF=0; // Habilitar interrupciones Timer1
    PIE4bits.TMR1IE=1; //limpiar flag
    PIR3bits.SSP1IF = 0; //limpiar flag
    PIR3bits.BCL1IF = 0; //limpiar flag
    PIE3bits.SSP1IE = 1; // Habilitar interrupciones mssp
    PIE3bits.BCL1IE = 1;
    INTCONbits.PEIE = 1; // para activar interrupciones periféricas
    INTCONbits.GIE = 1; // para activar globalmente las interrupciones
}
```

Fig. 7.8. Configuración de las interrupciones necesarias

7.1.3. Comunicación I2C

Como requisito, para implantar un protocolo de comunicación con el exterior y, que fuera interpretable por un agente externo, se instaura el uso de un bus de comunicación I2C.

Previamente se hizo una introducción del bus I2C y de su uso. En este capítulo se presentará un breve resumen de los conceptos básicos de la comunicación I2C y, se especificará el modo de empleo configurado en el software. Un resumen de las características de la comunicación I2C sería el siguiente:

- Es una interfaz de comunicación en serie para la comunicación con otros dispositivos o periféricos.
- Los dispositivos pueden comunicarse en ambiente esclavo/maestro, en el cual, los dispositivos maestros inician la comunicación.

- El dispositivo esclavo es controlado a través de una dirección previamente asignada.

Ahora, se procede a explicar en detalle el empleo del bus de comunicación I2C, empleado en este caso particular. Para ello, distinguiremos entre el dispositivo maestro (que será ejecutado por un dispositivo Raspberry PI) y el dispositivo esclavo (que serán los microcontroladores situados en los prototipos desarrollados).

La comunicación I2C dispone de varios modos de funcionamiento. En este caso se decide emplear el modo de escritura y de lectura de múltiples bytes. Esta elección se debe a la necesidad de leer, escribir y almacenar los datos, en varios bloques de ocho bits, provenientes de los tres sensores de temperatura de manera simultánea. En la figura 7.9 se muestra la secuencia de escritura (para dispositivos maestros y esclavos) y, en la figura 7.10 la secuencia de lectura [45].

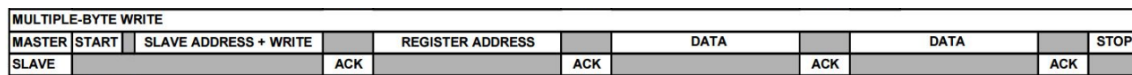


Fig. 7.9. Secuencia de escritura del I2C en modo multimaestro, Chris John [45]

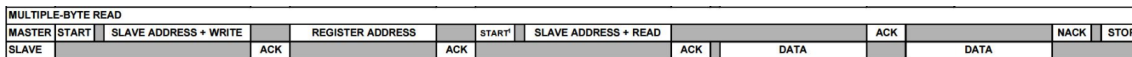


Fig. 7.10. Secuencia de lectura del I2C en modo multimaestro, Chris John [45]

Es necesaria establecer una configuración previa del dispositivo esclavo (figura 7.11), que es el que ha sido desarrollado en este estudio e incluido en el prototipo. La configuración del modo maestro viene incluida en el dispositivo maestro.

```
void I2C_Slave_Config(short address) {
    ANSELbits.ANSC0 = 0; //RC0 como digital
    ANSELbits.ANSC1 = 0; //RC1 como digital
    RC0PPS = 0x13; // entrada del reloj como outputs pin bidireccional del i2c
    RC1PPS = 0x14; // toma de datos como output pin bidireccional del i2c
    SSP1DATPPS = 0b10001; //como input es el pin bidireccional del i2c
    SSP1CLKPPS = 0b10000; //como input es el pin bidireccional del i2c
    SSP1STAT = 0x80;
    SSP1ADD = address;
    SSP1CON1 = 0x36;
    SSP1CON2 = 0;
    SSP1CON2bits.SEN = 1;
}
```

Fig. 7.11. Configuración I2C del dispositivo esclavo

Para la comunicación I2C, como fue indicado en el capítulo anterior, se emplean los pines SCL y SDA, los cuales son unos pines bidireccionales del módulo MSSP. Esto quiere decir que, ambos pines, actúan como entrada y salida de datos. Es necesario remarcar que, en la configuración los pines correspondientes al SCL y SDA, en este caso RC0

y RC1, han de declararse tanto como pines de salida del MSSP (RC0PPS y RC1PPS), como pines de entrada (SSP1DATPPS y SSP1CLKPPS), y como pines digitales (ANSELbits.ANSC0=0 y ANSELbits.ANSC1=0).

A la hora de establecer un control en la comunicación, se decide implementar un software cuyo funcionamiento está basado en el establecimiento de una máquina de estados que actúa como control y, evita que los datos se escriban o se lean de manera incorrecta.

Para ello, se establecen cuatro estados posibles, como se muestra en la figura 7.12, en los que, dependiendo del evento recibido, se procede a continuar a un estado u a otro.

```
enum {
    STATE_WAITING,
    STATE_REGISTER_W,
    STATE_DATA_W,
    STATE_DATA_R
};
```

Fig. 7.12. Estados disponibles para el funcionamiento del protocolo I2C

Para una mejor comprensión del funcionamiento de la máquina de estados empleada en la comunicación I2C, en la figura 7.13 se muestra su diagrama con los caminos que toma la comunicación en función de los datos e instrucciones recibidas.

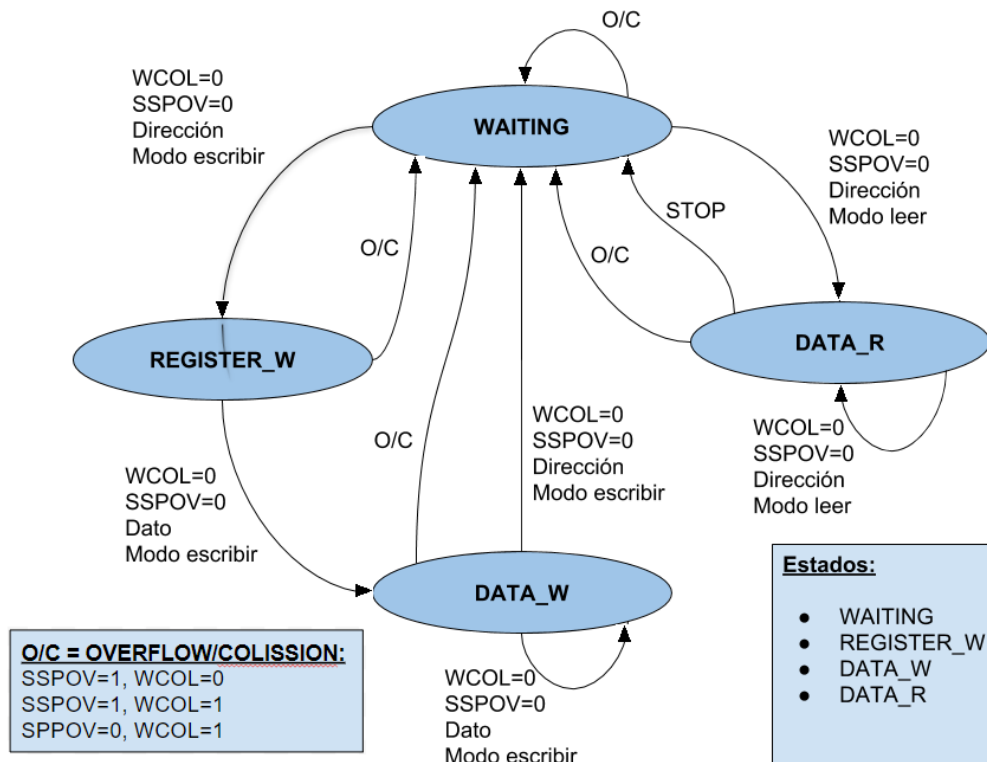


Fig. 7.13. Máquina de estados de la comunicación I2C

El proceso mostrado en la figura 7.13, comienza en el estado Waiting, para arrancar e iniciar la comunicación hemos de fijarnos en el valor del flag SSP1IF:

- Si el bit del SSP1IF está en valor 1, se ha detectado una interrupción y se comienza la comunicación I2C. Dependiendo de si se ha recibido una petición de lectura o escritura, se leerán los datos de los sensores o se configurará el ángulo de conducción del triac.
- Si el bit del SSP1IF está en valor 0, no hay ninguna interrupción y se continua en el estado waiting, o en el estado en el que se encuentre actualmente.

Todos los módulos programados han sido testeados para comprobar su correcto funcionamiento.

8. EVALUACIÓN DEL PROTOTIPO

Una vez recibidos los prototipos que se enviaron a fabricar, y antes de montar los componentes, se procede en primer lugar a comprobar que el serpentín se comporta conforme a lo esperado. Para esto, se empieza midiendo con un multímetro, la resistencia que ofrece el serpentín. Este dato varía entre $5,5\Omega$ y 6Ω dependiendo del prototipo medido, mientras que la esperada era de $6,41\Omega$.

El siguiente paso es proceder a la alimentación del mismo, con una corriente controlada mediante una fuente en medio aéreo.

8.1. Prototipo en el aire

Como primer experimento, la evaluación del dispositivo se realiza al aire. El experimento se lleva a cabo en una sala a una temperatura de 25°C , y se hace uso de los siguientes equipos:

- Una fuente reguladora de corriente.
- Un sensor de temperatura analógico (un termómetro), situado en la cara posterior del serpentín.
- Un sensor de temperatura digital (pistola térmica), que toma los datos a una distancia aproximada de 20 cm. Validado con una cámara térmica.
- Un prototipo.

Se realizan las conexiones necesarias de los elementos antes de proceder a realizar el experimento. Una vez preparado el entorno, se lleva a cabo un estudio mediante el aumento progresivo de la corriente, proveniente de la alimentación. Los resultados del estudio se muestran en la tabla 8.1.

En la figura 8.1 podemos ver la curva de evolución de la temperatura en función de la potencia.

Evaluación del prototipo al aire				
Corriente	Voltaje	Potencia	Termómetro	Pistola
0.24A	1,3V	0.312W	25°C	25,5°C
0.4A	2,2V	0.88W	32°C	38°C
0.6A	3.5V	2.1W	40°C	51.5°C
0.8A	5V	4W	52°C	70°C
1A	7.3V	7,3W	75°C	154°C
1,2A	10.2V	12.24W	91°C	198°C
1.4A	14.2V	19.88W	burn	254°C

TABLA 8.1. EVOLUCIÓN DE LA TEMPERATURA EN LA EVALUACIÓN DEL PROTOTIPO AL AIRE



Fig. 8.1. Gráfico de evolución de la temperatura en ensayo al aire

Como se puede observar en la tabla 8.1, un mínimo incremento en la corriente provoca un aumento de temperatura muy grande. Al llegar a valores en torno a los 1,5A, las pistas del serpentín empiezan a saltar. En definitiva, el prototipo se quema y queda inutilizado, como se observa en la figura 8.2.

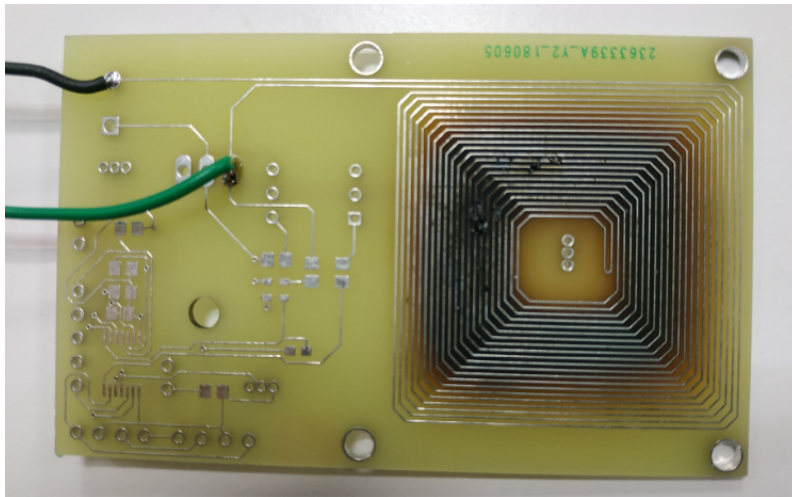


Fig. 8.2. Estado del dispositivo tras el ensayo al aire

Aunque el dispositivo estaba diseñado para soportar temperaturas cercanas a los 100°C , se puede observar que, en realidad, se alcanzan temperaturas mucho mayores. Este hecho podría deberse a la capa de estaño superficial del prototipo. Además se observa que el valor de la resistencia del serpentín varía con la temperatura.

El prototipo al aire tiene unas condiciones de funcionamiento máximas de 1.4A y el aire es capaz de refrigerar una potencia de, aproximadamente, 20W.

8.2. Prototipo en líquido

Como segundo experimento, la evaluación del dispositivo se realiza con el líquido dieléctrico objeto del estudio. El primer objetivo es comprobar que las placas aguantan una corriente al menos igual a la soportada en aire sin deteriorarse. Para ello se realiza un montaje similar al de la figura 8.3 y se alimenta cada placa individualmente (y por separado) con la fuente de alimentación. El resultado es que las placas sumergidas en líquido toleran hasta 2.2 Amperios (el máximo otorgado por la fuente) sin deteriorarse.

Los siguientes experimentos se llevan a cabo colocando los dispositivos en una pecera y, empleando los siguientes equipos:

- 4 transformadores de corriente.
- Un dispositivo Raspberry PI.
- Un alimentador de Raspberry PI.
- 4 Prototipos.

Se realizan los experimentos en dos escenarios diferentes:

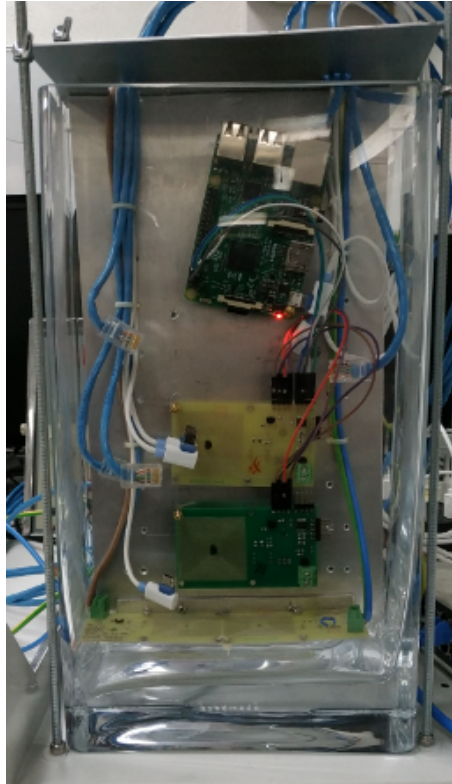


Fig. 8.3. Ejemplo de montaje inicial para la prueba del dispositivo en el líquido

- Dos placas inmersas en el líquido y dos placas situadas al aire.
- Todas las placas inmersas en el líquido variando las alimentaciones.

Para la realización de todos los estudios, se procede a dar una dirección específica a los microcontroladores de los prototipos. Para todos los experimentos realizados se seguirá el mismo procedimiento, es decir, se encenderá la fuente de alimentación, se establecerá un tiempo de control determinado y se esperará el tiempo suficiente hasta conseguir una temperatura estable.

El maestro envía una petición de lectura de los sensores a los prototipos cada 2 segundos y guarda los datos obtenidos en una base de datos, para así, poder acceder a ellos y obtener las gráficas que se muestran en este capítulo.

En los dos escenarios indicados, se realizan experimentos con diferentes configuraciones. La temperatura del sistema reflejada en las gráficas se muestra para cada una de ellas, siendo las configuraciones:

- Primera configuración: se monitoriza la temperatura del entorno. Dos prototipos generadores de calor inmersos en el líquido y, dos prototipos dedicados a la toma de datos de temperatura, situados al aire.
- Segunda configuración: se monitoriza, exclusivamente, la temperatura del líquido. Dos prototipos se encuentran inmersos en el líquido, generando calor y, dos pro-

totipos se encuentran inmersos en el líquido, tomando datos de la temperatura de éste.

- Tercera configuración: se monitoriza, exclusivamente, la temperatura del líquido. Dos placas inmersas generando calor y, simultáneamente monitorizando la temperatura.
- Cuarta configuración: se monitoriza, exclusivamente, la temperatura del líquido. Se dispone de cuatro prototipos dedicados a la generación de calor, de los cuales dos prototipos monitorizan la temperatura.

A continuación, se muestran las gráficas de todo el proceso de aumento de la temperatura, hasta la estabilización de la misma. Cada gráfica corresponde a un experimento. Para diferenciarlas, se identificarán mediante el número de experimento y la potencia absorbida. Los experimentos son los siguientes:

- Primera configuración, potencia 50W(figura 8.4).
- Segunda configuración, potencia 11W(figura 8.5).
- Segunda configuración, potencia 25W(figura 8.6).
- Segunda configuración, potencia 50W(figura 8.7).
- Tercera configuración, potencia 50W(figura 8.8).
- Cuarta configuración, potencia 100W(figura 8.9).

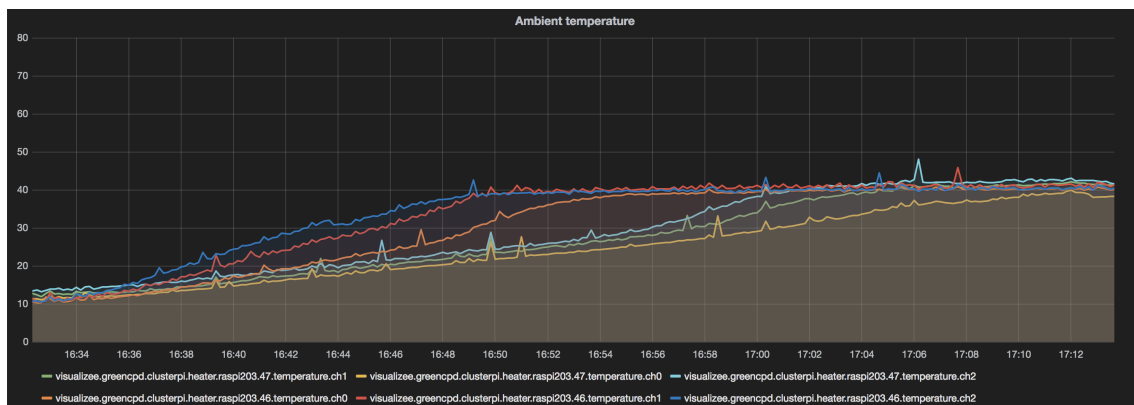


Fig. 8.4. Gráfica temperatura del experimento con primera configuración, 50W

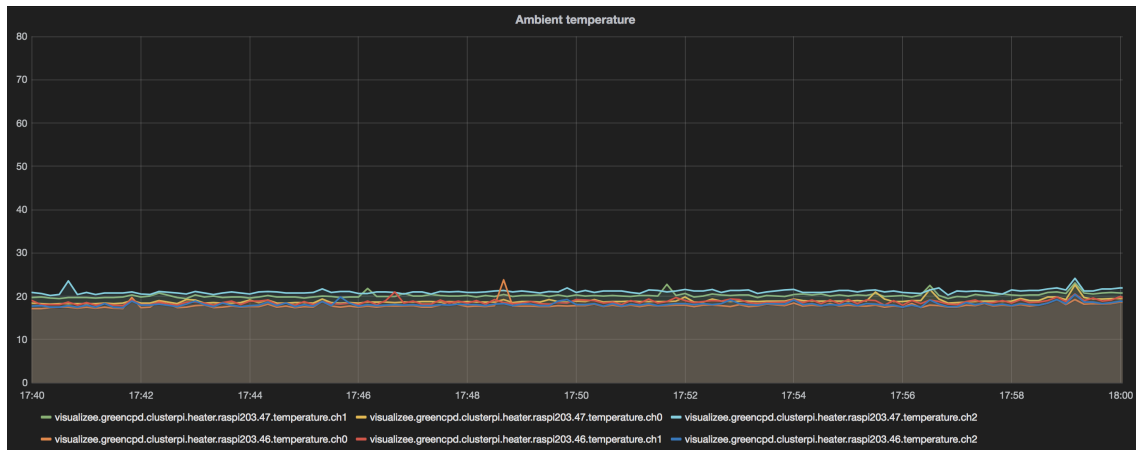


Fig. 8.5. Gráfica temperatura del experimento con segunda configuración, 11W

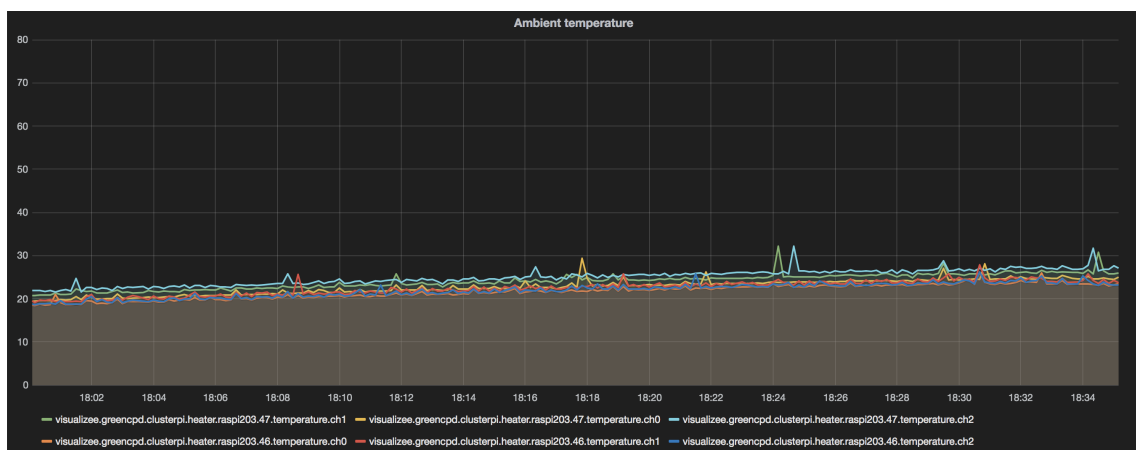


Fig. 8.6. Gráfica temperatura del experimento con segunda configuración, 25W

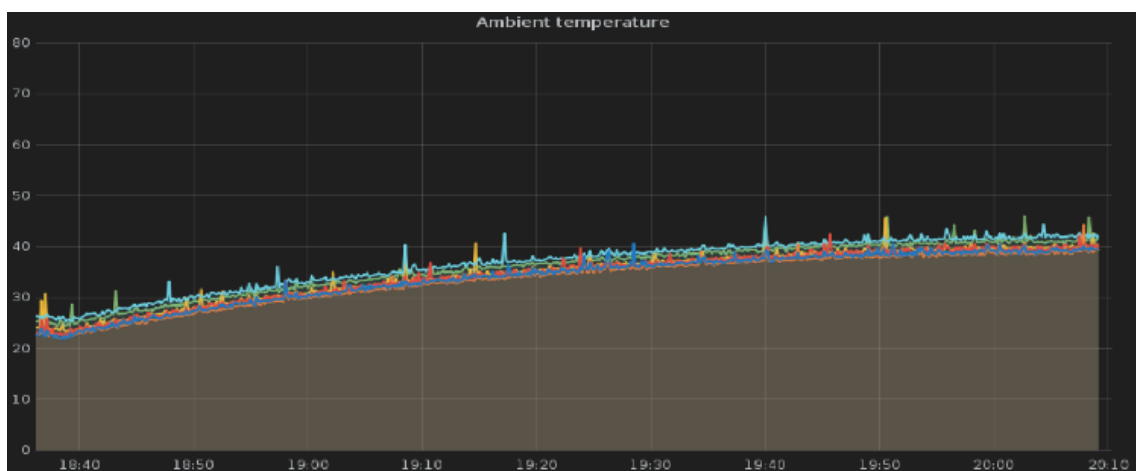


Fig. 8.7. Gráfica temperatura del experimento con segunda configuración, 50W

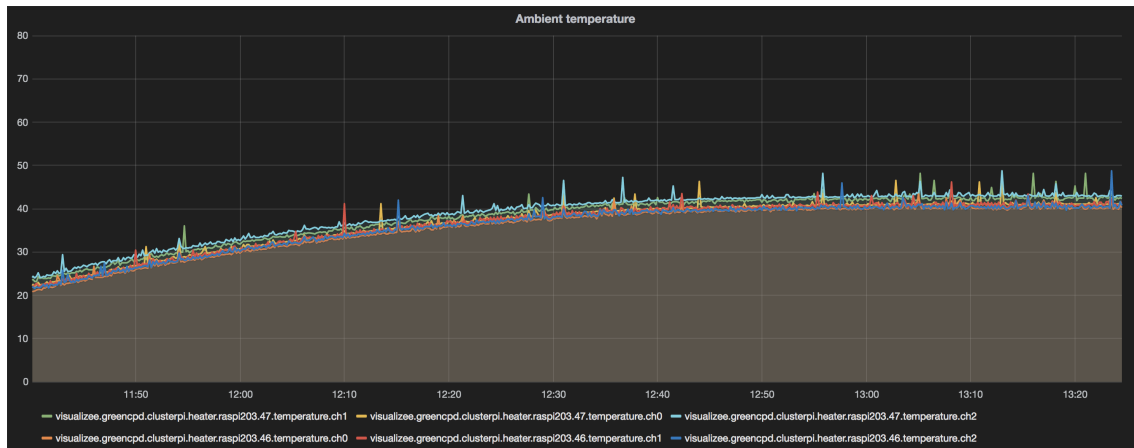


Fig. 8.8. Gráfica temperatura del experimento con tercera configuración, 50W

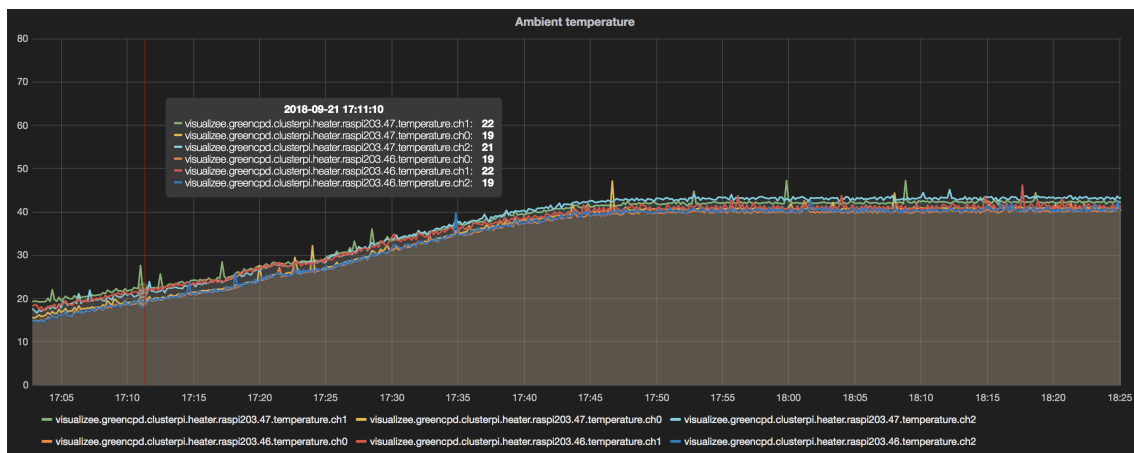


Fig. 8.9. Gráfica temperatura del experimento con cuarta configuración, 100W

Todas las gráficas mostradas tienen englobados todos los datos de los sensores situados en los dispositivos.

De estos experimentos realizados y, mediante el análisis de las gráficas obtenidas, se puede deducir:

- El experimento que mide la temperatura en el aire, con una potencia de 50W, llega a estabilizarse aproximadamente, a los 40°C. Si se compara esta gráfica con la obtenida en la que las dos placas de generación de calor están alimentadas a la misma potencia, pero sumergidas, podemos concluir que ambas temperaturas alcanzadas son similares. Por tanto, el líquido se debe estar evaporando o, el aire escapando del contenedor del experimento.
- En la segunda configuración, con todos los prototipos inmersos y una potencia de 11W, el líquido alcanza una temperatura de 22°C. Esta temperatura es próxima a la

que se encuentra el líquido en el ambiente. Comparando este valor obtenido en el experimento al aire (198°C), se puede determinar que la capacidad de arrastre de calor del líquido Novec 7100, realmente, es mayor que la del aire con una amplia diferencia.

- El prototipo al aire, con una potencia de 20W, queda inoperativo. De la gráfica obtenida en el experimento de inmersión con 25W, se observa, que la temperatura que se alcanza (25°C) es mucho menor y, el dispositivo continua operando con normalidad. El incremento de temperatura del líquido es despreciable.
- Se aprecia, en las gráficas, que se alcanza una temperatura cercana a los 40°C con 50W de potencia, tanto cuando los prototipos miden y son alimentados a la vez, como cuando unos son alimentados y otros reciben el calor (todos dentro del líquido). Por tanto, parece que el calor se distribuye homogéneamente por el líquido.
- El hecho de que las temperaturas en el experimento al aire y los experimentos inmersos en el líquido, con 50W de potencia, sean parecidas puede deberse a que el volumen del líquido empleado en el primer experimento, aún siendo menor que en los otros, resulta suficiente para disipar todo el calor generado.
- Por último, cuando se alimentan las cuatro placas a máxima potencia, la temperatura del líquido es ligeramente superior a 40°C. Por tanto, un incremento de 50W ha supuesto un incremento de un par de grados en el líquido. La otra diferencia que se aprecia, es que a mayor potencia, menor tiempo para alcanzar la temperatura estable.

Finalmente y, tras la realización de los experimentos, ha quedado demostrada la gran capacidad de disipación del líquido. Sin embargo, al no disponer de más prototipos preparados para generar calor, no se han podido realizar más experimentos para caracterizar mejor el líquido.

9. CONCLUSIONES

Para satisfacer la creciente demanda energética de los centros de datos y, conseguir una mejor utilización de los recursos, es fundamental mejorar las técnicas de refrigeración actuales. Dado que el consumo energético proveniente de los sistemas de refrigeración implantados en los centro de datos supone un alto porcentaje del consumo total, se están estudiando técnicas de refrigeración líquidas que ayuden a bajar dicho porcentaje.

Uno de los líquidos que se pretende usar para la refrigeración de estos sistemas es el Novec 7100. Este líquido es un HFE dieléctrico con gran capacidad de disipación, según el fabricante. Antes de introducir dispositivos como CPUs, GPUs o cualquier dispositivo destinado al procesamiento de datos, es necesario realizar un estudio para valorar la capacidad de arrastre y refrigeración del líquido en cuestión.

En este trabajo, se realiza un estudio previo para determinar los requisitos que debe cumplir un prototipo que permita generar calor de manera controlada (emulando un procesador), con el objetivo de realizar el estudio del líquido. El coste final del prototipo será mucho menor que el de cualquier otro equipo IT que se plantee sumergir en él.

Una vez definidos los requisitos, se procede a diseñar un prototipo para obtener la PCB del mismo. Una vez fabricada, se realiza el montaje de los componentes hardware y la programación del microcontrolador que la gobierna, probando que todo funcione.

Una vez obtenidos los prototipos finales, se ha conseguido probar con éxito los mismos, en completo funcionamiento, sumergidos en el líquido dieléctrico a estudiar. De ello se han podido obtener una serie de gráficas de temperaturas (mostradas en el capítulo anterior), que nos permiten conocer algunas capacidades del líquido.

En la introducción, se mostró una gráfica teórica (facilitada por el fabricante) de la evolución de la temperatura en función de la potencia empleada. En esta gráfica, no viene incluido ningún dato en cuanto a proporciones de líquido o cantidad de potencia a emplear. Con los experimentos realizados, no se ha podido alcanzar la potencia y temperatura que se requieren para encontrar el límite de funcionamiento del líquido, sin embargo se ha podido caracterizar el líquido en algunos puntos.

Lo que sí queda probado es que, la capacidad de arrastre de calor del Novec 7100 (líquido dieléctrico), es considerablemente mayor que la de los métodos de refrigeración por aire, manteniendo el prototipo en completo funcionamiento y, manteniendo unas temperaturas que pueden ser soportadas por los equipos electrónicos. Esto implica alargar la vida útil del prototipo en el tiempo y una disminución de los gastos de mantenimiento.

Una vez se disponga de más prototipos, se podrá realizar un estudio más a fondo sobre el Novec 7100. Existen múltiples opciones para su estudio, algunos ejemplos son: cambio de volúmenes (de recipientes y de líquido empleado), aumentar el número de prototipos a sumergir, la potencia de los dispositivos y la disposición de los mismos.

10. ENTORNO SOCIO-ECONÓMICO

10.1. Impacto socio-económico

Haciendo referencia al trabajo expuesto, se puede determinar que la aplicación del estudio realizado al mundo actual representa ventajas socio-económicas tanto a corto como a largo plazo, de las cuáles se muestran a continuación algunas de ellas:

A corto plazo:

- Mediante la inmersión de los prototipos en el HFE y, la comprobación del correcto funcionamiento de los mismos, queda demostrado que el líquido no produce daños en los equipos.

Frente a otros sistemas de refrigeración líquida como por ejemplo, agua, permite evitar la inutilización de los equipos que conllevan las fugas. El uso de los HFE nos permite introducir cualquier equipo electrónico en su interior sin dejarlo inutilizado y, evitando así los costes que conllevaría la sustitución de los equipos por completo.

- El líquido ha probado su capacidad de refrigeración y arrastre de calor, mucho mayor que otros sistemas de refrigeración distribuidos actualmente en el mercado. Su aplicación real en los sistemas de refrigeración podría comenzar a corto plazo.

A largo plazo:

- La aplicación del estudio mejora considerablemente la eficiencia energética de los centros de datos, reduciendo drásticamente el consumo energético derivado de la refrigeración de los equipos IT.
- La reducción drástica del consumo energético lleva implícito un menor coste económico de los recursos económicos empleados. El mantenimiento de las instalaciones dedicadas a la refrigeración se reduce, así como la reducción del número de unidades necesarias para la misma cantidad de trabajo.
- La sustitución progresiva de los sistemas de refrigeración actuales por los basados en la refrigeración mediante HFE en los próximos años, supondría una menor demanda energética global.
- Al tener una mayor capacidad de cómputo en un espacio reducido, respecto a los demás sistemas de la actualidad, la implantación de grandes centros de datos, con enormes consumos para proveer servicios a la sociedad, podría verse sustituido por pequeños centros de datos portátiles con similares capacidades de cómputo. Estos sistemas requerirían de una menor energía para su funcionamiento y podrían ofrecer servicios para comunidades, empresas y demás sectores del ámbito industrial.

- Además, el Novec 7100, como indica el fabricante en sus especificaciones, es de baja toxicidad, no inflamable y de bajo índice GWP. Sustituye a otros productos dañinos contra la capa de ozono y que provocan gases de efecto invernadero (CFC, HFC y HCFC), esto supone una reducción de las emisiones nocivas que afectan a problemas tan preocupantes como el calentamiento global.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Howell, *Number of Connected IoT Devices Will Surge to 125 Billion by 2030, IHS Markit Says*, <https://technology.ihs.com/596542/number-of-connected-iot-devices-will-surge-to-125-billion-by-2030-ihs-markit-says>, 2017.
- [2] A. Shilov, *Intel Forms New Group for Autonomous Vehicles and Announces 250M Investment*, <https://www.anandtech.com/show/10872/intel-forms-new-group-for-autonomous-vehicles-and-announces-250m-investment>, 2016.
- [3] P. B. Maria Avgerinou y L. Castellazzi, *Trends in Data Centre Energy Consumption under the European Code of Conduct for Data Centre Energy Efficiency*, www.mdpi.com/1996-1073/10/10/1470/pdf, [Online; accessed 19-May-2017], 2008.
- [4] I. Aransay, M. Zapater, P. Arroba y J. M. Moya, “A Trust and Reputation System for Energy Optimization in Cloud Data Centers”, en *2015 IEEE 8th International Conference on Cloud Computing*, jun. de 2015, pp. 138-145. doi: 10.1109/CLOUD.2015.28.
- [5] D. C. Knowledge, *Special Report: The World's Largest Data Centers*, <https://www.datacenterknowledge.com/special-report-the-worlds-largest-data-centers/>, 2010.
- [6] R. Sadler, *Video demand drives up global CO2 emissions*, <https://climatenewsnetwork.net/video-demand-drives-global-co2-emissions/>, 2017.
- [7] Cisco, *Cisco Global Cloud Index: Forecast and Methodology, 2016–2021*, <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/global-cloud-index-gci/white-paper-c11-738085.pdf>, 2018.
- [8] M. Rouse, *power usage effectiveness (PUE)*, <https://searchdatacenter.techtarget.com/definition/power-usage-effectiveness-PUE>, 2009.
- [9] T. G. Grid, *PUETM: A COMPREHENSIVE EXAMINATION OF THE METRIC*, https://datacenters.lbl.gov/sites/all/files/WP49-PUE%20A%20Comprehensive%20Examination%20of%20the%20Metric_v6.pdf, 2012.
- [10] A. Dandekar, *8 power usage effectiveness (PUE) best practices for your data center*, <https://www.computerweekly.com/tip/8-power-usage-effectiveness-PUE-best-practices-for-your-data-center>, 2011.
- [11] B. Aodbc, *Técnicas de optimización de la climatización en el Datacenter*, <http://blog.aodbc.es/2012/06/04/tecnicas-de-optimizacion-de-la-climaticacion-en-el-datacenter/>, 2012.

- [12] M. Rouse, *hot/cold aisle*, <https://searchdatacenter.techtarget.com/definition/hot-cold-aisle>, 2009.
- [13] 42u, *Cold Aisle Containment*, <https://www.42u.com/cooling/cold-aisle-containment.htm>, 2010.
- [14] —, *Improve Energy Efficiency with Hot Aisle Containment while supporting higher density server applications*, <https://www.42u.com/cooling/hot-aisle-containment.htm>, 2012.
- [15] —, *Free cooling with Data Center Economizer Solutions*, <https://www.42u.com/cooling/economizers/economizers.htm>, 2012.
- [16] S. Technologies, *Data center cooling methods*, <https://submer.com/data-center-cooling-methods/>, 2018.
- [17] I. Perspectives, *Water-cooled Solutions for High Density Rack Cooling*, <https://www.datacenterknowledge.com/archives/2014/06/23/water-cooled-solutions-high-density-rack-cooling>, 2014.
- [18] 3M, *Two-Phase Immersion Cooling A revolution in data center efficiency*, <http://multimedia.3m.com/mws/media/11279200/2-phase-immersion-cooling-a-revolution-in-data-center-efficiency.pdf>, 2015.
- [19] —, *3MTM NovecTM 7100 Engineered Fluid*, <http://multimedia.3m.com/mws/media/1998180/3mtm-novectm-7100-engineered-fluid.pdf>, 2018.
- [20] —, *3M Data Center Solutions Server Solutions*, <https://multimedia.3m.com/mws/media/11743830/data-center-server-brochure.pdf>, 2015.
- [21] —, *Fluido especial 3MTM NovecTM 7100*, https://www.3m.com.es/3M/es_ES/empresa-es/todos-productos-3m/~/Fluido-especial-3M-Novec-7100/?N=5002385+8709318+8709341+8710650+8710710+8711017+8717595+8736412+8745549+3294002049&rt=rud, 2018.
- [22] B. O. del Estado (BOE), *Real Decreto Legislativo 1/1996*, <https://www.boe.es/boe/dias/1996/04/22/pdfs/A14369-14396.pdf>, 1996.
- [23] AEMS, *Buenas prácticas de laboratorio*, <https://www.aemps.gob.es/industria/inspeccionBPL/home.htm#guiasBPL>, 2018.
- [24] I. O. for Standardization, *ISO 639-1:2002 Codes for the representation of names of languages – Part 1: Alpha-2 code*, <https://www.iso.org/standard/22109.html>, 2002.
- [25] T. I. for Interconnecting y P. E. Circuits, *IPC-2221 Generic Standard on Printed Board Design*, <http://ch00fttech.com/wp-content/uploads/2016/12/IPC-2221-2.pdf>, 1991.
- [26] 42u, *Hot Aisle/Cold Aisle Layout for Data Center Racks*, <https://www.42u.com/cooling/hot-aisle-cold-aisle.htm>, 2009.

- [27] Oracle, *Requisitos de disipación de calor y circulación de aire*, https://docs.oracle.com/cd/E63755_01/html/E63764/gomsx.html, 2016.
- [28] B. aodbc, *Contención en pasillo frío vs contención en pasillo caliente (Refrigeración)*, <http://blog.aodbc.es/2012/08/23/contencion-en-pasillo-frio-vs-contencion-en-pasillo-caliente-refrigeracion/>, 2012.
- [29] N. A. Solutions, *Free Cooling Concepts for Data Centers*, <https://www.nortekair.com/wp-content/uploads/2017/01/Free-Cooling-Concepts-for-Data-Centers.pdf>, 2015.
- [30] D. Media, *STULZ impulsa el Free Cooling en el centro de datos*, <https://www.dcd.media/noticias/stulz-impulsa-el-free-cooling-en-el-centro-de-datos/>, 2017.
- [31] M. data in motion, *How Data Center Free Cooling Works and Why it is Brilliant*, <https://www.masterdc.com/blog/what-is-data-center-free-cooling-how-does-it-work/>, 2015.
- [32] Chilldyne, *Liquid Cooling for Data Centers System Overview*, <http://www.chillydyne.com/wp-content/uploads/2017/09/Chillydyne-Liquid-Cooling-System-Overview.pdf>, 2018.
- [33] D. Mascola, *CRAC VS CRAH*, <http://www.dchuddle.com/2011/crac-v-crah/>, 2011.
- [34] APC, *InRow Chilled Water Cooling*, https://www.apc.com/shop/us/en/categories/cooling/close-coupled-air-conditioners/inrow-chilled-water-cooling/_/N-19txb82, 2018.
- [35] D. Club, *The data-center of eBay passes to doors with water cooling*, <http://developers-club.com/posts/226031/>, 2014.
- [36] E. Fluids, *Single-phase, Liquid Immersion Cooling Solutions for Data Centers, Colocation Facilities, & Central Offices*, <https://www.engineeredfluids.com/for-data-centers>, 2018.
- [37] Revolvvy, *Server immersion cooling*, <https://www.revolvvy.com/page/Server-immersion-cooling>, 2018.
- [38] P. Guerra, *Transmission Lines: stack of layers in a PCB*, Private, 2017.
- [39] B. Suppanz, *Trace Width Calculator*), <https://www.4pcb.com/trace-width-calculator.html>, [Online; accessed 07-September-2018], 2018.
- [40] ST, *Precision temperature sensors*, http://www.farnell.com/datasheets/1837109.pdf?_ga=2.66057966.1152056809.1537227975-977501792.1535810900&_gac=1.250757554.1535810900.EAIaIQobChMIjdCqt_2Z3QIVWojVCh3Gkw-iEAYASAAEgI-nPD_BwE, 2008.
- [41] NXP, *Implementing a Lamp Dimmer with an HC908Q Family MCU*, <https://www.nxp.com/docs/en/application-note/AN2839.pdf>, [Online; accessed 08-September-2018], 2018.

- [42] Microchip, *PIC16(L)F18426/46*, [http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Microchip-8-bit-PIC-MCU-PIC16\(L\)F18426_46-Datasheet-40001985A.pdf](http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Microchip-8-bit-PIC-MCU-PIC16(L)F18426_46-Datasheet-40001985A.pdf), 2017.
- [43] —, *PICkitTM 3 In-Circuit Debugger/Programmer User's Guide For MPLAB® X IDE*, <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/52116A.pdf>, 2016.
- [44] J. I. Huircán, *Conversores Análogo-Digital y Digital-Análogo: Conceptos Básicos*, <https://core.ac.uk/download/pdf/47281302.pdf>, 2015.
- [45] C. John, *I2C-AppNotes*, <https://github.com/labjack/I2C-AppNotes/blob/master/Accelerometer-ADXL345/README.md>, 2018.

A. ANEXO 1: ACRÓNIMOS

En este anexo se encuentran los acrónimos empleados en la memoria en orden de aparición:

- IoT (Internet of Things)= internet de las cosas.
- ADAS (Advanced Driver Assistance Systems)= sistemas de asistencia a la conducción.
- MDPI (Multidisciplinary Digital Publishing Institute)= instituto multidisciplinario de publicaciones digitales.
- JRC (Joint Research Center)= centro común de investigación.
- IT (Information Technology)= tecnología de la información.
- SAI = Sistema de Alimentación Ininterrumpida.
- PUE (Power Usage Effectiveness)= eficiencia del uso de la energía.
- DCIE (Data Center Infrastructure Efficiency)= eficiencia de la infraestructura del centro de datos.
- HFE = Hidro-Fluoro-Éter.
- CFC = Cloro-Fluoro-Carbonos.
- HFC = Hidro-Fluoro-Carbonos.
- GWP (Global Warming Potencial) = potencial de calentamiento global.
- BPL = Buenas Practicas de Laboratorio.
- CRAC (Computer Room Air Conditioner) = aire acondicionado de sala de ordenadores.
- CRAH (Computer Room Air Handler) = ordenador de aire de la sala de ordenadores.
- HVAC (Heating Ventilating Air Conditioner) = calefacción ventilación aire acondicionado.
- CPU (Central Processing Unit) = unidad central de procesamiento.
- 2PIC = inmersión en dos fases.
- I2C (Inter Integrated Circuit) = circuito ínter integrado.

- SPI (Serial Peripheral Interface) = interfaz periférica en serie.
- DIP (Dual In-line Package) = paquete de doble hilera.
- LED (Light Emitting Diode) = diodo emisor de luz.
- DIAC (Diode Alternative Current)= diodo para corriente alterna.
- SMD (Surface Mount Device) = dispositivos de montaje superficial.
- TRIAC (Triode for Alternating Current)= triodo para corriente alterna.
- PWM (Pulse Width Modulation)= modulación por ancho de pulsos.
- ADC (Analog to Digital Conversion) = conversión analógico digital.
- DAC (Digital to Analog Conversion) = conversión digital analógica.
- MSSP (Master Synchronous Serial Port Module) = modulo maestro síncrono de puerto serie.
- CCP (Capture Compare PWM)= captura comparación modulación.
- ZCD (Zero Cross Detection)= detección de paso por cero.
- ESD (Electrostatic Discharge)= descarga electrostática.
- PCB (Printed Circuit Board)= placa de circuito impreso.

B. ANEXO 2: PRESUPUESTO DE LA ELABORACIÓN DEL TFG

A continuación se muestra el desglose del presupuesto:

- El coste total de los recursos materiales es de 151,50€(ver tabla B.1).
- El coste total de los recursos de mano de obra es de 3450,00€(ver tabla B.2).
- Otro costes (gastos generales) es de 788,73€(ver tabla B.3).
- El coste total del proyecto es de 5312,18€(ver tabla B.4).

	Coste de recursos materiales				
	Cantidad	Precio unitario	Uso(m)	Amortización(a)	Total
Ordenador personal	1	800,00 €	6	5	80,00 €
Líquido Novec 7100	1	300,00 €	6	4	37,50 €
Raspberry PI	1	40,00 €	6	4	5,00 €
Alimentador Raspberry PI	1	10,00 €	6	5	1,00 €
Pecera	1	30,00 €	6	5	3,00 €
Prototipo	10	10,00 €	6	2	25,00 €
TOTAL					151,50 €

TABLA B.1. COSTE DE RECURSOS MATERIALES

	Coste mano de obra		
	Horas	Precio/Hora	Total
Trabajador	300	10,00 €	3000,00 €
Tutor	30	15,00 €	450,00 €
TOTAL			3450,00 €

TABLA B.2. COSTE DE RECURSOS DE MANO DE OBRA

Otros costes			
Gastos generales	15 %	Sobre C.D	540,23 €
Beneficios industriales	6 %	Sobre C.D + C.I	248,50 €
TOTAL			788,73 €

TABLA B.3. OTROS GASTOS

Coste final	
Subtotal presupuesto	4390,23 €
IVA aplicable (21 %)	921,95 €
TOTAL	5312,18 €

TABLA B.4. COSTES TOTALES DE ELABORACIÓN.